

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

**Marília Cossetin Antonello**

**SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO E RENDIMENTO DE GRÃOS  
DA SOJA EM CONDIÇÕES IRRIGADA E DE SEQUEIRO NO RIO  
GRANDE DO SUL**

**Santa Maria, RS  
2019**

**Marília Cossetin Antonello**

**SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO E RENDIMENTO DE GRÃOS DA SOJA  
EM CONDIÇÕES IRRIGADA E DE SEQUEIRO NO RIO GRANDE DO SUL**

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

Orientadora: Profa. Dra. Mirta Teresinha Petry

Santa Maria, RS  
2019

Antonello, Marília

Simulação do balanço hídrico e rendimento de grãos da soja em condições irrigada e de sequeiro no Rio Grande do Sul / Marília

Antonello.- 2019.

66 p.; 30 cm

Orientador: Mirta Teresinha Petry

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2019

1. SIMDualKc 2. Evapotranspiração 3. Déficit hídrico I. Petry, Mirta Teresinha II. Título.

---

© 2019

Todos os direitos autorais reservados a Marília Cossetin Antonello. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: marilia\_antonello@hotmail.com

Marília Cossetin Antonello

**SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO E RENDIMENTO DE GRÃOS DA SOJA  
EM CONDIÇÕES IRRIGADA E DE SEQUEIRO NO RIO GRANDE DO SUL**

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

Aprovado em 6 de março de 2019:



---

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



---

**Zanandra Boff de Oliveira, Dra. (UFSM)**



---

**Geraldo José Rodrigues Dr. (IFSC)**

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Santa Maria, pública e gratuita, ao Centro de Ciências Rurais, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela possibilidade de realização deste curso e pela bolsa de estudos concedida.

Aos meus pais Mara Cossetin Antonello e Alberto Valerio Antonello, que sempre incentivaram e priorizaram o estudo, muitas vezes abdicando das suas prioridades em função dos filhos.

À professora Mirta Petry e o professor Reimar Carlesso pela orientação durante o período de iniciação científica e pós-graduação, tão importante para o meu crescimento profissional e pessoal.

A todos os colegas de doutorado, mestrado e iniciação científica do Sistema Irriga® que tive a oportunidade de conhecer, pela amizade ao longo dos anos de convívio.

Ao Douglas Haubert, sou enormemente agradecida pela possibilidade de dividirmos um experimento juntos, por todo apoio, ajuda e amizade nos momentos que mais precisei.

A todos aqueles que, de alguma maneira, ajudaram na realização deste trabalho.

Ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, mesmo que tivesse toda a fé, a ponto de mover montanhas, e não tivesse amor, nada seria.

(Coríntios 13)

## RESUMO

### SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO E RENDIMENTO DE GRÃOS DA SOJA EM CONDIÇÕES IRRIGADA E DE SEQUEIRO NO RIO GRANDE DO SUL

AUTORA: Marília Cossettin Antonello  
ORIENTADORA: Mirta Teresinha Petry

A irrigação por aspersão sob pivô central é a mais difundida entre as propriedades agrícolas de médio a grande porte no Sul do Brasil. Entender a dinâmica da água nesse contexto é trabalhoso e dispendioso, entretanto, através do uso de ferramentas como a modelagem, o manejo da água da irrigação (chuva+irrigação) pode ser otimizado. Assim, o objetivo do presente estudo foi realizar a simulação do balanço hídrico do solo e sua relação com o rendimento de grãos da soja, em uma área irrigada e de sequeiro, além de avaliar a produtividade da água (WP), identificar o fator de redução do rendimento ( $K_y$ ) e utilizar o modelo empírico de Stewart para a predição do rendimento. Utilizou-se o modelo SIMDualKc, que calcula a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) utilizando a metodologia dos coeficientes de cultivo dual ( $K_c$  dual), separando a evaporação da água do solo ( $E_s$ ) da transpiração da cultura ( $T_c$ ). O experimento foi conduzido em Júlio de Castilhos – RS (safra 2017/18), em uma área irrigada sob pivô central de 29 ha e uma de sequeiro de 7,7 ha. O conteúdo de água no solo foi monitorado em ambas as áreas, utilizando-se sensores de matriz granular (watermark), instalados na camada intermediária de 0-20, 20-40, 40-60 cm de profundidade. A caracterização físico-hídrica do solo local foi realizada previamente à instalação do experimento. Além disso, foram realizadas avaliações morfológicas periódicas da cultura. As informações meteorológicas foram coletadas de uma estação meteorológica automática, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a aproximadamente 30 km da propriedade, e o monitoramento da irrigação foi realizado pelo Sistema Irriga®. Os dados observados foram utilizados para calibrar e validar o modelo de balanço hídrico do solo. Os valores de  $K_{cb}$  inicial, médio e final, ajustados para as condições locais foram, respectivamente 0,10; 1,07 e 0,35. O conteúdo de água no solo observado (ASW) foi comparado ao simulado pelo modelo através de indicadores estatísticos ( $b_0$ : Coeficiente linear de regressão;  $R^2$ : Coeficiente de determinação; RMSE: Raiz quadrada do erro médio; AAE: Erro médio absoluto; ARE: Erro relativo médio; EF: Eficiência de modelagem; e PBIAS: Percentagem de viés). Os resultados apresentando boa associação entre os valores observados de água disponível no solo (ASW) e aqueles simulados pelo modelo, com coeficiente de regressão ( $b_0 = 1$ ) em ambas as áreas, e RMSE de 4,43 e 4,85 mm, respectivamente, para as áreas irrigadas e de sequeiro. A eficiência do uso da água foi baixa, resultado da alta precipitação pluviométrica ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, e uma  $ET_c$  média de 534 mm (área irrigada) e 517 mm (área de sequeiro), além das perdas por percolação profunda e escoamento superficial, observado pelos resultados do balanço hídrico do solo. A diferença entre o rendimento médio de grãos entre as áreas foi estatisticamente similar. A partir da função de Stewart foi gerado o coeficiente de resposta ao rendimento ( $K_y = 0,9$ ), para prever o rendimento de grãos da soja. A predição do rendimento com a abordagem Stewart-SIMDualKc gerou um RMSE de 1245 kg ha<sup>-1</sup>.

**Palavras-chave:** SIMDualKc, evapotranspiração, déficit hídrico.

## ABSTRACT

### WATER BALANCE MODELING AND SOYBEAN GRAIN YIELD IN IRRIGATED AND RAINFED CONDITIONS IN RIO GRANDE DO SUL STATE

AUTHOR: Marília Cossetin Antonello

ADVISOR: Mirta Teresinha Petry

Central pivot sprinkler is the most widespread irrigation method among medium and large farms in southern Brazil. Understanding the water dynamics in this context is difficult and expensive, however, using modern tools such as modeling, irrigation water management (rain + irrigation), can be optimized at the level of farmers. Therefore, the objective of the resent study was to simulate the soil water dynamic and its relation with crop grain yield in an irrigated and rainfed area, as well as to evaluate water productivity (WP), identify the yield response factor ( $K_y$ ) and to use Stewart's empirical model for predicting yield. We used the SIMDualKc model, which calculates crop evapotranspiration ( $ET_c$ ) using the dual culture coefficient (dual  $K_c$ ) methodology, separating soil water evaporation ( $E_s$ ) from crop transpiration ( $T_c$ ). The experiment was conducted in the municipality of Júlio de Castilhos - RS (2017/18 season), in an irrigated area under a central pivot of 29 ha and a rainfed area of 7.7 ha. The water content in the soil was monitored in both areas, using watermark, installed in the intermediate layer of 0-20, 20-40, 40-60 cm depth. The physical-water characterization of the local soil was performed prior to the installation of the experiment. In addition, periodic morphological evaluations of the culture were performed. The meteorological information was collected from an automatic meteorological station, belonging to the National Institute of Meteorology (INMET), located approximately 30 km from the property, and irrigation monitoring was performed by the Irrig System®. The observed data were used to calibrate and validate the soil water balance model. The initial, mean and final  $K_{cb}$  values adjusted for the local conditions were, respectively, 0.10; 1.07 and 0.35. The observed soil water content (ASW) was compared to the simulated by the model using statistical indicators ( $b_0$ : regression coefficient;  $R^2$ : determination coefficient; RMSE: root mean square error; AAE: average absolute error; ARE: average relative error; EF: modeling efficiency; and PBIAS: percentage of bias). The results showed a good association between the observed values of available soil water (ASW) and those simulated by the model, with regression coefficient ( $b_0 = 1$ ) in both areas, and RMSE in relation to irrigated and rainfed area was 4.43 and 5.05 mm, respectively. The water use efficiency was low, as a result of the high rainfall during the crop development cycle, and a mean  $ET_c$  of 534 mm (irrigated area) and 517 mm (rainfed area), in addition to the losses by deep percolation and surface runoff observed results of the soil water balance. The difference between the average grain yield between the areas was statistically similar. From the Stewart function, the yield response coefficient ( $K_y = 0.9$ ) was generated to predict the grain yield of the soybean. The prediction of yield using the Stewart-SIMDulKc approach generated a RMSE of 1245 kg ha<sup>-1</sup>

Key words: SIMDualKc, evapotranspiration, water deficit.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Localização da área de estudo – Júlio de Castilhos – RS, 2017.....	25
Figura 2-	Valores diários de temperatura máxima, mínima e média (°C) (a), evapotranspiração de referência ( $ET_o$ , mm) e radiação solar ( $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ ) (b), observados durante o período experimental.....	28
Figura 3-	Variação diária entre a água disponível no solo (ASW, mm) observada e simulada, na área irrigada (a) e de sequeiro (b), sendo (●) dados observados e (—) dados simulados.....	42
Figura 4-	Evolução do índice de área foliar (IAF), figura (a), e da altura (cm), figura (b), observados entre o período inicial e o desenvolvimento máximo da cultura, na área irrigada e de sequeiro – Júlio de Castilhos – RS.....	44
Figura 5-	Comparação entre os dados de água disponível no solo (ASW, mm), observados e simulados pelo modelo SIMDualKc para a cultura da soja, nas áreas irrigada (a) e de sequeiro (b).....	46
Figura 6-	Variação diária do coeficiente de cultura basal ( $K_{cb}$ , —), coeficiente de evaporação ( $K_e$ , - -), coeficiente de cultura ajustado ( $K_{c\ act}$ , —), e coeficiente de cultura basal ajustado ( $K_{cb\ adj}$ , —), com precipitações (—, mm) e irrigações (—, mm) ao longo do ciclo da cultura da soja, para a área irrigada (a) e de sequeiro (b) – Júlio de Castilhos, RS.....	47
Figura 7-	Variação diária da evaporação do solo ( $E_s$ , mm) e transpiração da cultura ( $T_c$ , mm) para a área irrigada (a) e de sequeiro ao (b) longo do ciclo da cultura – Júlio de Castilhos, RS.....	51
Figura 8-	Mapa da lacuna de rendimento da soja, expresso em $kg\ ha^{-1}$ , da lavoura do produtor rural em Júlio de Castilhos – RS. O círculo representa a área irrigada por pivô central e nos entornos as áreas de sequeiro.....	55
Figura 9-	Relação entre os valores de rendimento de grãos da soja observados e simulados pela abordagem SIMDualKc-Stewart.....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Propriedades físicas e hidráulicas do solo da área experimental, Júlio de Castilhos – RS.....	26
Tabela 2 -	Parâmetros utilizados para estimar o conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta$ ), referente à cada profundidade da área irrigada e de sequeiro.....	29
Tabela 3 -	Datas dos estádios de desenvolvimento da cultura da soja conforme modelo SimDualKc. Júlio de Castilhos – RS, 2017.....	31
Tabela 4 -	Altura de plantas (h) e fração de cobertura do solo pelo dossel (fc) durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja em Júlio de Castilhos – RS.....	33
Tabela 5 -	Coefficiente de cultura basal ( $K_{cb}$ ), fração de depleção sem estresse ( $p$ ) e parâmetros de evaporação de água do solo, escoamento superficial e percolação profunda, padronizados e calibrados no SIMDualKc.....	34
Tabela 6 -	Datas das imagens analisadas com os respectivos períodos de desenvolvimento da cultura para a área irrigada e de sequeiro.....	41
Tabela 7 -	Indicadores estatísticos relativos ao conteúdo de água no solo (ASW) da cultura da soja, em área irrigada e de sequeiro com base nas simulações utilizando o modelo SIMDualKc.....	44
Tabela 8 -	Componentes do balanço hídrico referentes à área irrigada e de sequeiro em Júlio de Castilhos, RS.....	49
Tabela 9 -	Evaporação de água do solo ( $E_s$ , mm) e transpiração da cultura ( $T_c$ , mm) em cada estágio de desenvolvimento da cultura da soja (2017/18), para a área irrigada e de sequeiro em Júlio de Castilhos, RS.....	50
Tabela 10 -	Componentes de rendimento da soja: altura de inserção da primeira vagem, número de vagens por planta, número de grãos por planta e peso de mil grãos (g), com as respectivas médias referentes as áreas de sequeiro e irrigada. Júlio de Castilhos, RS, 2018.....	52
Tabela 11 -	Produtividade física e econômica da água (WP e EWP) para os respectivos rendimentos obtidos na área irrigada e de sequeiro, Júlio de Castilhos – RS.....	53
Tabela 12 -	Desvios entre o rendimento observado e previsto da soja utilizando a combinação SIMDualKc-Stewart referente a todos os dados observados.....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS\*

AAE	Erro médio absoluto
a e 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 sementeira
EF	Eficiência de modelagem
$E_s$	Evaporação da água do solo (mm)
$ET_c$	Evapotranspiração da cultura (mm)
$ET_{c\ act}$	Evapotranspiração da cultura ajustada (mm)
$ET_o$	Evapotranspiração de referência (mm)
fc	Fração de solo coberto pelo dossel vegetativo
h	Altura da planta (m)
$K_c$	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 estresse
$K_y$	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 estresse
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	Balanço 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)
$Z_e$	Espessura da camada com água evaporável (m)
$Z_r$	Comprimento radicular (m)
$Y_a$	Rendimento observado (kg)
$Y_m$	Rendimento potencial (kg)
WP	Produtividade total da água ( $kg\ m^{-3}$ )

\*As siglas e abreviaturas foram utilizadas 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 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	17
2.1 OBJETIVO GERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	18
3.1 MODELAGEM DO BALANÇO HÍDRICO .....	18
3.2 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA (WP) .....	20
3.2 DÉFICIT HÍDRICO NA SOJA.....	21
3.3 RENDIMENTO DA CULTURA DA SOJA.....	22
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	25
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL E DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO .....	25
4.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SIMDualKc.....	32
4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	35
4.4 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA E INDICADORES DO USO DA ÁGUA .....	36
4.5 PREDIÇÃO DO RENDIMENTO .....	37
<b>4.5.1 Coeficientes de cultura basais derivados do índice de vegetação de refletância</b> .....	39
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	42
5.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SIMDualKc.....	42
5.2 DINÂMICA DOS COEFICIENTES DE CULTURA .....	46
5.3 COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA .....	48
5.4 RENDIMENTO DA CULTURA E PRODUTIVIDADE DA ÁGUA.....	51
5.5 PREDIÇÃO DO RENDIMENTO .....	54
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	58
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	59

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil tornou-se líder mundial na produção e exportação de commodities agrícolas, principalmente a soja (*Glycine max*), com uma área cultivada de aproximadamente 35 milhões de hectares (CONAB, 2018). A maior parte da soja no mundo é cultivada em condições de sequeiro, como nos Estados Unidos, Índia, África, Brasil e China (HEINEMANN et al., 2016). A quantidade e distribuição das chuvas variam de ano para ano durante o ciclo de cultivo, o que causa instabilidade na produção e reduz a receita dos agricultores (GAJIĆ et al., 2018). Portanto, naqueles locais em que a reposição de água ao solo pelas chuvas é insuficiente para suprir a demanda da cultura, a irrigação suplementar pode aumentar significativamente o rendimento da soja (HEATHERLY, 1983; KARAM et al., 2005; MONTOYA et al., 2017) e estabilizar a produção agrícola, especialmente durante anos de escassez hídrica.

No Rio Grande do Sul, a irrigação suplementar é utilizada em períodos de déficits hídricos de diferentes intensidades causados em função da distribuição irregular das chuvas, mesmo que estas ocorram em volumes elevados. O estado do RS contabiliza 2617 pivôs centrais, totalizando uma área irrigada por esse equipamento de 178.050 hectares (RIBEIRO et al., 2018), o que possibilita a sucessão de até três cultivos anuais (SILVEIRA et al., 2013). Além disso, apresenta vantagens, como a fácil automação, alta uniformidade de aplicação, podendo atingir uma eficiência de até 85%, além de possuir a capacidade de operar em relevo com topografia irregular, comum na região central do Rio Grande do Sul.

O uso da água de irrigação concentra-se, em particular, nos desafios relacionados ao uso e consumo de água (PEREIRA & PAREDES, 2018), tendo em vista o aumento da pressão sobre os recursos hídricos. A ênfase na melhoria da gestão da água na agricultura exige dos produtores irrigantes que aumentem a eficiência do uso da água da irrigação, ou seja, aumentem o rendimento das culturas com reduzido consumo de água (PEREIRA et al., 2012). Portanto, o conceito de produtividade da água ( $WP, \text{kg m}^{-3}$ ) proposto por Pereira et al. (2002) é uma relação do rendimento de culturas comercializáveis ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) por unidade de água utilizada.

É importante considerar que as melhorias na eficiência do uso da água devem ocorrer, primeiramente dentro do contexto das necessidades locais dos produtores, o que inclui dificuldades de se obter o rendimento real e a quantidade total das entradas de água em grandes áreas. Rodrigues et al. (2013), ressalta que questões econômicas relacionadas à produtividade da água também devem ser levadas em consideração, uma vez que o objetivo do produtor é sempre alcançar a maior receita, no entanto, o maior retorno econômico não implica em repor

toda a água que a evapotranspiração da cultura demanda, assim como, o de atingir o rendimento potencial, não significa obter o máximo lucro do cultivo.

Através da combinação de experimentos de campo e estudos de modelagem, pode-se avaliar a gestão dos recursos hídricos e os impactos de períodos de estresse hídrico de forma mais consistente (JHA et al., 2018). Os modelos de balanço hídrico no solo (SWB) permitem uma análise adequada do comportamento das culturas quando submetidas a diversas estratégias de manejo. O modelo SIMDualKc, desenvolvido por ROSA et al. (2012a; b), tem sido utilizado para simular o balanço hídrico do solo. Essa ferramenta utiliza a abordagem do coeficiente dual de cultivo para calcular a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) mediante a realização do balanço hídrico diário do solo.

A utilização do coeficiente de cultivo dual ( $K_c$  dual) permite estimar tanto a transpiração da cultura ( $T_c$ ) quanto a evaporação do solo ( $E_s$ ) através da partição do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) em dois coeficientes, o coeficiente de cultura basal ( $K_{cb}$ ), que é específico da cultura e representa a razão de  $T_c$  pela evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), e o coeficiente de evaporação do solo ( $K_e$ ), que representa a proporção diária de  $E_s$  pela  $ET_o$ . Em condições de deficiência hídrica, o  $K_{cb}$  é ajustado pelo coeficiente de estresse hídrico ( $K_s$ ). Além disso, essa abordagem proposta por primeiramente por Wright (1982) e adotado pela FAO 56 (ALLEN et al., 1998) e Allen et al. (2005b), produz estimativas mais precisas da  $E_s$  em relação à abordagem do coeficiente de cultivo simples ( $K_c$  simples). Incluindo também a partição da evaporação ocasionada pela chuva e irrigação, principalmente para culturas de cobertura parcial do solo e situações de molhamento frequente pela chuva e/ou irrigação. Na fase inicial do ciclo, a  $E_s$  é alta quando uma fração significativa da superfície do solo é exposta à radiação solar (ZHAO et al., 2013).

Variações na vegetação, altura e índice de área foliar (IAF), e na cobertura do solo implicam em diferentes valores de  $K_c$  ao longo do período de crescimento. A curva do  $K_c$  pode ser dividida em quatro fases distintas de crescimento: inicial, desenvolvimento da cultura, meia estação e final da estação. O boletim FAO-56 fornece valores padronizados de  $K_c$  para diversas culturas e fases de crescimento, porém, esses valores precisam ser ajustados para refletir os efeitos das condições locais, práticas agronômicas ou variedades culturais (ALLEN et al., 2005a). Assim, modelos de simulação bem calibrados estão sendo cada vez mais utilizados como uma forma alternativa de gestão do uso de água nas fazendas, em uma ampla gama de condições ambientais e de manejo (ZHANG et al., 2013; PEREIRA & PAREDES 2018).

Os modelos de balanço hídrico, no entanto, precisam de conexão com funções de rendimento da água. A combinação do modelo SIMDualKc com o modelo água-produção de

Stewart (STEWART et al., 1977), expressa a relação linear entre a perda de produção relativa ao déficit de evapotranspiração através do fator de resposta de produção de água ( $K_y$ ), ou através da versão modificada em que a evapotranspiração relativa é substituída pelo déficit relativo da transpiração.

As funções água-produção são uma forma eficaz de predizer o rendimento real das culturas, e o conhecimento da resposta do rendimento da soja à água é útil para avaliar as estratégias de manejo de irrigação a serem adotadas pelos agricultores (GIMÉNEZ et al., 2017). A maioria dos estudos recentes sobre as funções água-produção estão concentrados em regiões áridas e semiáridas e pouco em regiões úmidas (ZHANG et al., 2018), como o Sul do Brasil. Entretanto, mesmo em uma região úmida, o rendimento das culturas depende muito mais da distribuição das chuvas do que seu volume total, assim como, o impacto que causa sobre o rendimento, ou seja, o conhecimento da resposta da cultura ao estresse hídrico.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo do presente estudo foi combinar o balanço hídrico simulado do solo através do modelo SIMDualKc com observações de campo em área de produtor rural, visando avaliar o rendimento de grãos da soja em área de sequeiro e irrigada sob pivô central na região central do Rio Grande do Sul.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos utilizando dados observados a campo consistiram em: (i) calibrar e validar o modelo de balanço hídrico SIMDualKc para estimar a transpiração das culturas e evaporação do solo; (ii) análise dos componentes do balanço hídrico do solo em relação às condições meteorológicas do local; (iii) avaliar a produtividade da água (WP) e a produtividade da água irrigada (IWP); e (iv) identificar o fator de redução do rendimento ( $K_y$ ) e utilizar o modelo empírico de Stewart para prever o rendimento da cultura da soja.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 MODELAGEM DO BALANÇO HÍDRICO

Em sistemas de cultivo irrigado, os agricultores aplicam uma quantidade excessiva de água de irrigação para garantir o máximo rendimento (GRASSINI et al., 2011b). Entretanto, para atingir rendimentos máximos, a quantidade de água fornecida para a irrigação durante o ciclo de desenvolvimento deve apenas atender as necessidades efetivas de água da cultura. Sendo que, a exigência de água pela cultura é definida como a quantidade de água necessária para compensar a perda por evapotranspiração. A evapotranspiração é a combinação de dois processos que ocorrem simultaneamente, a perda de água através da evaporação da superfície do solo e transpiração da cultura (ALLEN et al., 1998).

A evaporação é influenciada sobretudo pela disponibilidade de água no solo e pelos fatores meteorológicos, e diminui ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, à medida que a fração de cobertura do solo pelo dossel aumenta. Uma vez que a cultura cobre totalmente o solo, as perdas ocorrem basicamente por transpiração.

A  $ET_c$  pode ser medida a partir de diversos métodos descritos por Allen et al. (2011a), como lisímetros (drenagem ou pesagem), cintilômetros, covariância de vórtices turbulentos, razão de Bowen, métodos de fluxo de seiva, sensoriamento remoto, índices de vegetação, bem como o balanço hídrico do solo.

O conceito de balanço hídrico avalia o solo esquematicamente como um reservatório, expresso em termos de depleção de água no solo na zona radicular, no qual faz a adição e subtração dos parâmetros de entrada e saída de água no solo. A chuva, irrigação, e ascensão capilar ou contribuição de águas subterrâneas, adicionam água à zona radicular, em contrapartida, a evaporação do solo, transpiração da cultura e as perdas por percolação profunda retiram água da zona radicular e aumentam a depleção. Assim, segundo Pereira & Paredes (2018), as necessidades de água para irrigação estimadas via SWB consistem na quantidade de água que é fornecida à cultura quando a oriunda da chuva, armazenamento de água no solo e ascensão capilar não satisfazem a demanda da cultura.

Uma abordagem amplamente utilizada para a estimativa do requerimento hídrico das culturas via SWB é a abordagem  $K_c-ET_o$  adotada pelo boletim FAO56 (ALLEN et al., 1998). Para facilitar a aplicação desse conceito, inúmeros modelos de SWB foram produzidos e disponibilizados ao longo das últimas duas décadas para prever o requerimento hídrico das culturas (PEREIRA et al., 1992, 1995). O modelo SIMDualKc, desenvolvido por Rosa et al.

(2012a; b), tem como base o cálculo da  $ET_c$ , utilizando a metodologia dos coeficientes duais de cultivo ( $K_{cb} + K_e$ ), proposta por Allen et al. (1998, 2005a), que divide os componentes em  $E_s$  e  $T_c$ . A curva do  $K_c$  assume uma forma linear (DOORENBOS & PRUITT, 1977), representando simplifadamente as mudanças médias que ocorrem ao longo do ciclo do cultivo e divide-se em quatro etapas principais (Inicial, desenvolvimento da cultura, meia estação e final).

Além disso, o modelo SIMDualKc avalia os impactos de resíduos culturais na superfície sobre a evaporação do solo; oferece várias opções para agendamento de irrigação usando os conceitos da parametrização da fração de depleção para não-estresse ( $p$ ), total de água disponível (TAW) e água prontamente disponível (RAW) (ALLEN et al., 1998). O balanço hídrico também pode ser realizado em escala diária para áreas sem irrigação, além de oferecer a possibilidade de simular um calendário de irrigação predefinido, que é frequentemente usado quando se tem medições do conteúdo de água no solo a campo, para calibrar e validar o modelo.

Aplicações bem-sucedidas do SIMDualKc foram relatadas para uma ampla variedade de culturas e ambientes, como cereais (ROSA et al., 2012b; MARTINS et al., 2013; PAREDES et al., 2014; GIMÉNEZ et al., 2016), olericultura (QIU et al., 2015), culturas de valor comercial (FANDIÑO et al., 2015; PEREIRA et al., 2015b; WEI et al., 2015; GIMÉNEZ et al., 2017; PAREDES et al., 2017b), forragens (PAREDES et al., 2018) e videiras (FANDIÑO et al., 2012).

O modelo AquaCrop, da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) (RAES et al., 2018), é um modelo semi-empírico e determinístico, que visa tanto a produtividade das culturas, quanto a simulação do uso da água e requer um número relativamente pequeno de parâmetros. Já os modelos de crescimento são desenvolvidos com o propósito de entender os processos fisiológicos das plantas, auxiliar na avaliação dos potenciais de rendimento, bem como avaliações de impacto climático (CERA et al., 2017). O SoySim é um novo modelo de simulação de crescimento de soja (SETIYONO et al., 2010) que requer menos parâmetros quando comparado a outros modelos como o CROPGRO, já o modelo Sinclair-Soybean (SINCLAIR, 1986) é o modelo mais simples quanto à parametrização (CERA et al., 2017).

O sistema de apoio à decisão para transferência de agrotecnologia (DSSAT), descrito por Jones et al. (2003), é uma coleção de programas independentes que operam juntos para facilitar a aplicação de modelos de culturas. O modelo CROPGRO-Soybean (BOOTE et al., 1998) é um dos mais utilizados para simular o crescimento e a produtividade da soja, sendo um dos sistemas de apoio à decisão do DSSAT-CSM. A aplicação do modelo CROPGRO requer muitos parâmetros específicos de entrada, além disso, simulações com o CROPGRO

envolvendo processos dinâmicos da água, e sua relação com a produtividade não tem sido avaliada de forma abrangente em áreas de soja (MERCAU et al., 2007). O modelo híbrido RZWQM-CROPGRO (MA et al., 2005) combina uma abordagem mais precisa da dinâmica de água e solutos, resultando em um modelo mais útil para aplicações práticas relacionadas à água.

Os modelos de crescimento e produtividade das culturas são bastante complexos, sendo assim, esses modelos são geralmente mais adequados para fins de pesquisa ou previsão de rendimento do que para uso operacional como suporte ao manejo de irrigação pelos agricultores.

### 3.2 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA (WP)

O alto consumo de água no setor agrícola evidencia a necessidade de adoção de estratégias conjuntas destinadas a alcançar maior eficiência no uso da água. Conforme sugerido por Pereira et al. (2012), os recursos hídricos podem ser avaliados por meio de indicadores, como a produtividade da água (WP), que é a quantidade de benefícios físicos ou econômicos derivados do uso da água. A WP ( $\text{kg m}^{-3}$ ) é expressa entre a razão do rendimento real da cultura ( $Y_a$ ) e a correspondente água utilizada, e conforme o denominador utilizado, a WP pode referir-se ao uso total da água (TWU); ao uso consuntivo, que consiste na fração de água que é consumida e que não está mais disponível após o uso final ( $ET_{c \text{ act}}$ ); apenas ao uso da água da irrigação (IWU); ou apenas em relação à transpiração da cultura ( $T_c$ ) (PEREIRA & PAREDES, 2018). A WP pode ser expressa também em termos econômicos, quando o numerador é substituído pelo valor monetário do rendimento alcançado (PEREIRA et al., 2012).

Uma alta produtividade da água pode ser alcançada encontrando maneiras de elevar a produtividade por unidade de água consumida, em sistemas agrícolas irrigados e de sequeiro (KASSAM et al., 2007; MOLDEN et al., 2010). No entanto, os valores de produtividade da água podem ser variáveis, em função das práticas de manejo da cultura e conservação do solo adotadas, assim como da distribuição local das chuvas. Kassam et al. (2007) sinalizam que, apenas parte da água da chuva que é absorvida pela cultura, o restante drena ou evapora, ou seja, melhorias na WP, tanto a nível de produtor ou em nível da bacia hidrográfica, podem ser obtidas aumentando o uso efetivo da água das chuvas, água armazenada e águas residuais, assim como, minimizar todas as perdas por percolação profunda na zona radicular, escoamento superficial, incluindo as perdas por evaporação. No entanto, melhorias na gestão da água

agrícola (GENG et al., 2019; SHARMA et al., 2015; LIU et al., 2017) incluem o desafio de quantificar com precisão a água requerida pelas culturas.

### 3.2 DÉFICIT HÍDRICO NA SOJA

A água é o principal fator que afeta o rendimento das culturas (BOYER, 1992). A relação entre absorção de água e produção de culturas ocorre em função da demanda evaporativa da atmosfera. Segundo Specht et al. (2001), a demanda atmosférica está relacionada com os fatores meteorológicos interagindo com o dossel de plantas, sua intensidade depende principalmente da demanda evaporativa da atmosfera, quanto mais elevada for, maior será o fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera. A disponibilidade hídrica pode ser avaliada a partir de medidas quantitativas do conteúdo de água em órgãos vegetais, indicadores quantitativos indiretos, como sintomas visuais, ou pela água disponível no solo (MEYER & GREEN, 1981), definida pela diferença entre o conteúdo de água no solo, explorado pelo sistema radicular das plantas, entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente.

O déficit hídrico ocorre, portanto, quando a perda de água por transpiração excede a absorção de água radicular. O crescimento e desenvolvimento das plantas é controlado diretamente pelos déficits e a resposta das plantas levam à inibição do crescimento e da fotossíntese. Segundo Taiz & Zeiger (2017), o processo mais afetado pela deficiência hídrica é a expansão celular e, conseqüentemente, o decréscimo da área foliar. Vale ressaltar que as respostas das plantas são um reflexo da estratégia da planta em lidar com a disponibilidade hídrica do solo. Além disso, há menor translocação de fotoassimilados em razão da diminuição da fotossíntese, aceleração da senescência e abscisão das folhas, a fim de reduzir o uso da água (SANTOS & CARLESSO 1998; THOMAS & COSTA, 1994). No entanto, a redução da disponibilidade de água às plantas estimula o alongamento das raízes para zonas mais úmidas e profundas do solo.

A soja é uma cultura que tolera bem o déficit hídrico na fase vegetativa e seu requerimento hídrico varia de 450-700 mm de água durante a estação de crescimento (DOORENBOS e KASSAM, 1979; GRASSINI et al., 2015). Durante a fase vegetativa, déficits moderados por períodos curtos não causam reduções significativas no rendimento, entretanto, é mais sensível durante o estágio reprodutivo (R1-R8) e, conforme a planta senesce, a capacidade de compensar perdas diminui e o potencial grau de redução de rendimento aumenta (FOROUD et al., 1993).

De forma sucinta, os estágios R1 e R2 descrevem a floração da cultura. Sob déficit hídrico, o rendimento de grãos nessa fase pode ser reduzido em até 6% se 50% das folhas forem perdidas. O estágio R4 marca o início do período mais crítico de desenvolvimento da planta quanto à determinação do rendimento, e a irrigação suplementar durante essa fase é essencial para manter o bom desenvolvimento da cultura (MONTROYA et al., 2017). Em R5, período de enchimento do grão, a planta atinge altura e IAF máximos e estresses durante esse período podem causar reduções de rendimento significativas, tendo em vista que a demanda por água durante esse período é alta.

Na literatura existem diversos estudos sobre o desempenho das culturas quando submetidas a períodos de estresse hídrico e a irrigação suplementar como forma de minimizar os efeitos de déficit e aumentar o rendimento das culturas (SENTELHAS et al., 2015; GAGIC et al., 2018; JHA et al., 2018). Segundo Torres et al. (2016), a maioria dos sistemas globais de irrigação são suplementares às chuvas. No Brasil, em especial no Rio Grande do Sul, nas áreas irrigadas, uma quantidade significativa de água usada pelas culturas vem da chuva, e, embora a irrigação suplementar utilize lâminas de água limitadas, devido aos índices de chuva relativamente altos, o objetivo é atingir rendimentos máximos e eliminar as lacunas de rendimento causadas por déficits hídricos (FERERES & SORIANO, 2007). Além disso, a irrigação suplementar em climas úmidos é frequentemente mais eficiente do que a irrigação nas zonas áridas, porque os déficits de vapor d'água nas zonas úmidas levam a uma maior eficiência de transpiração do que nas zonas áridas (TANNER & SINCLAIR, 1983).

### 3.3 RENDIMENTO DA CULTURA DA SOJA

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, com uma produção de 119 milhões de toneladas e produtividade média de 3.382 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2018). Ainda, a produção brasileira de soja para a safra 2018/2019 estima um recorde de 120,5 milhões de toneladas (USDA, 2018). A safra 2017/2018 se beneficiou do clima favorável e do uso de alta tecnologia, que elevou os rendimentos para níveis recordes em quase todos os locais, exceto no Sul (USDA, 2018). Apesar do domínio tecnológico, os baixos rendimentos obtidos e a variabilidade espacial e temporal dos rendimentos no Rio Grande do Sul, tem como causa principal a oscilação na disponibilidade hídrica (MATZENAUER et al., 2018).

De uma maneira geral, o rendimento de grãos (Y) da maioria das culturas pode ser descrito como uma função linear da evapotranspiração máxima das culturas (ET<sub>c</sub>) (Vaux &

Pruitt, 1983), sendo essa baseada em fatores meteorológicos e nas características da cultura. Existem diferenças conceituais sobre o termo rendimento, sendo rendimento potencial ( $Y_m$ ) aquele que não apresenta limitações de crescimento, influenciado apenas por fatores climáticos (radiação solar, temperatura,  $CO_2$ ) (SENTELHAS et al., 2015). O rendimento potencial ( $Y_m$ ) pode ser estimado por modelos de culturas ou dito como o rendimento máximo obtido pelos agricultores, em sistemas de produção de alta tecnologia. Apesar da análise padrão ser baseada em modelos, a avaliação baseada em produções obtidas com os próprios agricultores pode ser utilizada em escala regional, desde que em sistemas de cultivo intensivamente manejados e após a análise de várias áreas, a fim de atingir pelo menos um campo com rendimento próximo ao potencial (DI MAURO et al., 2018). Já o rendimento atingível ou real ( $Y_a$ ) depende do manejo da cultura e é limitado apenas pela disponibilidade hídrica (LOBELL et al. 2009), logo, a diferença de rendimento entre  $Y_m$  e  $Y_a$  é determinado pelo déficit hídrico.

No Rio Grande do Sul, terceiro maior produtor de soja do país, a ocorrência de déficit hídrico na estação de cultivo é comum. Apesar da chuva no RS, em termos médios, ser bem distribuída nas quatro estações do ano, a chuva é, em geral, insuficiente para atender às necessidades hídricas das culturas dessa estação (BERLATO, 1992). Segundo o autor, isso ocorre em razão da maior demanda evaporativa da atmosfera no verão, determinada especialmente pela maior densidade de fluxo energético e maior temperatura do ar. Um estudo de Matzenauer et al. (2017) sobre a distribuição de chuvas no RS relata que, em eventos La Niña (chuva abaixo da média climatológica) chove menos na primavera e em anos Neutros ocorrem quantidades de chuvas menores em janeiro e março, período de importância para a produção de grãos. Sendo assim, as perdas de produtividade causadas pelo déficit hídrico são observadas principalmente no sul do Brasil, com lacunas superiores a  $1600 \text{ kg ha}^{-1}$ . As perdas de rendimento potencial por deficiência hídrica aumentam da região do Planalto do RS em direção ao Sul do estado (SENTELHAS et al., 2015; MATZENAUER, 2000).

A influência do clima sob os rendimentos pode ser minimizada com o uso de irrigação, tendo em vista que o Rio Grande do Sul tem potencial para aumentar as áreas irrigadas de soja, considerando que possui uma área efetivamente disponível para irrigação de 855.795 ha (ANA 2017; EMBRAPA, 2013). Alguns estudos têm tentado identificar as causas da variação de produtividade nas áreas de produtores (GRASSINI et al, 2015; SENTELHAS et al., 2015), essa lacuna de rendimento tem como causa principal o déficit hídrico. Pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de relacionar o suprimento de água com a produtividade das culturas agrícolas englobando ampla faixa de condições climáticas, cujos resultados têm sido usados para

formular modelos empíricos ou funções de água-produção, que podem ser úteis para estimar possíveis impactos negativos da falta de chuvas em determinada região, assim como, no rendimento de grãos das culturas.

O modelo água-produção de Stewart (STEWART et al., 1977) assume uma variação linear das perdas de rendimento ( $1 - Y_a/Y_m$ ) em relação a evapotranspiração na escala temporal ( $1 - ET_{c\ act}/ET_c$ ), através do fator de resposta de produção de água  $K_y$ , sendo os rendimentos real ( $Y_a$ ) e potencial ( $Y_m$ ), produzidos quando ET são, respectivamente, a ET atual ( $ET_{c\ act}$ ) e potencial da cultura ( $ET_c$ ) durante o ciclo de desenvolvimento (DOORENBOS & KASSAM, 1979; GIMÉNEZ et al., 2017). A versão modificada do modelo de Stewart substitui a evapotranspiração relativa pelo déficit relativo da transpiração ( $1 - T_{c\ act}/T_c$ ), calculada pelo modelo SIMDualKc, que particiona diariamente a ET.

O método de Wageningen (DOORENBOS & KASSAM, 1979) por sua vez, tem como hipótese básica que a máxima matéria seca produzida por uma cultura resulta de uma evapotranspiração máxima. Baseado no conceito de De Wit (1965), a produtividade potencial de uma cultura, em dado clima, é calculada a partir da cultura padrão, utilizando dados de radiação solar e evapotranspiração. Sua aplicação às culturas se faz por meio de parâmetros que dependem da cultura, da temperatura, da eficiência de crescimento (respiração), da relação entre a parte colhida e a produtividade final, e do clima.

Para a previsão do rendimento, essas funções são frequentemente utilizadas em combinação com modelos de balanço hídrico do solo para explicar as relações entre evapotranspiração e rendimento. Modelos empíricos que relacionam o rendimento com a evapotranspiração (JENSEN 1968, HANKS 1974, STEWART 1977, DOORENBOS & KASSAM 1979) podem ser utilizados em combinação com o modelo de balanço hídrico do solo SIMDualKc para prever rendimentos. A combinação do modelo SIMDualKc-Stewart tem sido utilizada com sucesso para cereais (PEREIRA et al., 2015b; GIMÉNEZ et al., 2016) e leguminosas (WEI et al., 2015; PAREDES et al., 2017; GIMÉNEZ et al., 2017).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL E DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi desenvolvido em uma propriedade rural, no ano agrícola de 2017/18, no município de Júlio de Castilhos, região central do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1), situado em Latitude 29° 13' 37" S, Longitude 53° 40' 54" W e altitude de 529 metros. O clima da região é do tipo “cfa”, subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes, de acordo com a classificação climática de Köppen (KOTTEK et al., 2006).

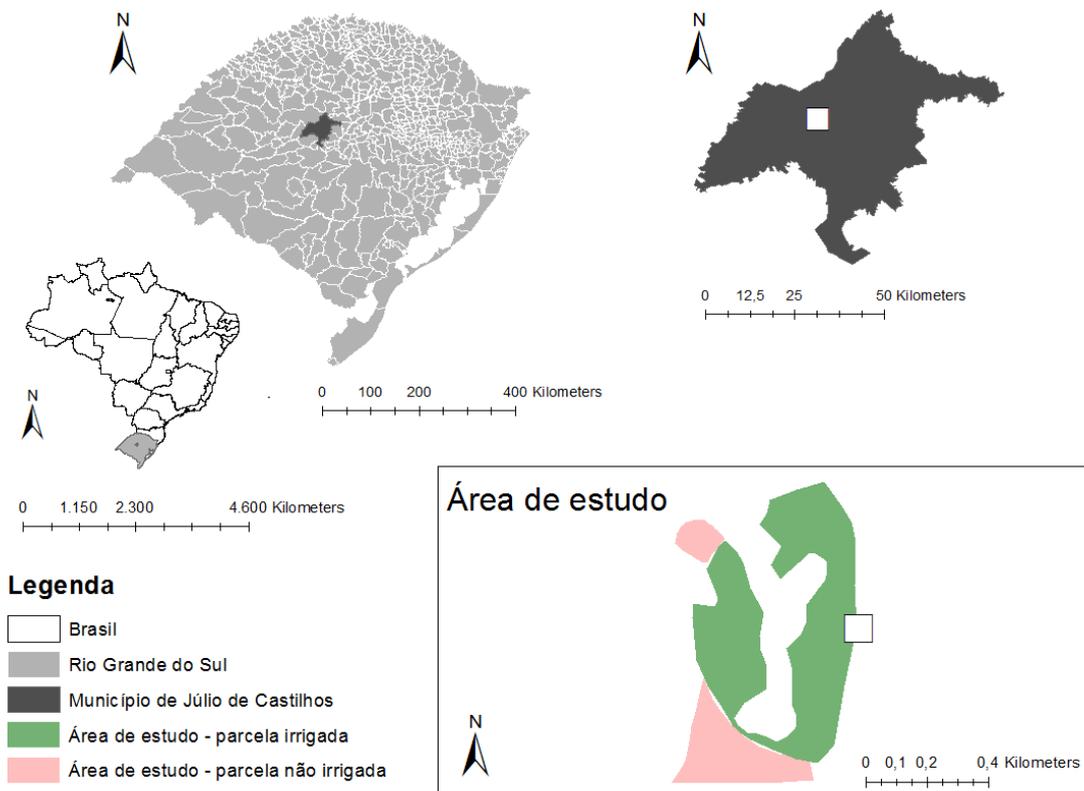


Figura 1 – Localização da área de estudo – Júlio de Castilhos – RS, 2017.

A área de estudo compreende 29 hectares irrigados por pivô central, identificada pela cor verde na figura 1, e 7,7 hectares do entorno do pivô (borda) de área de sequeiro, identificada pela cor rosa. Além disso, a área é irregular em seu formato, pois contém uma zona de preservação ambiental dentro da área irrigada (Figura 1). O pivô central utilizado para irrigação é da marca Valley, pressão no final da tubulação de 13 mca, vazão de 380 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, aspersores do tipo super spray, totalizando um raio irrigado de 503,82 m e uma área circular de 79,74 ha,

sendo assim, a gleba irrigada utilizada para as observações do estudo representou 36% da área útil do pivô, considerando que o restante da área estava cultivado com a cultura do feijão.

O solo do local está classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico úmbrico (EMBRAPA, 2013). A coleta de solo para a caracterização físico-hídrica foi realizada próximo aos sensores de umidade no solo, no sétimo lance do pivô central (área irrigada) e na área de borda do pivô (área de sequeiro), nas camadas intermediárias das profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm. As propriedades físicas e hidráulicas do solo foram determinadas no laboratório de solos do Sistema Irriga® na UFSM e os resultados das áreas amostradas são apresentados na tabela 1.

Tabela 1– Propriedades físicas e hidráulicas do solo da área experimental, Júlio de Castilhos – RS, 2017.

Área	Prof. (cm)	Ds (g cm <sup>-3</sup> )	Dp (g cm <sup>-3</sup> )	Textura (%)			θ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )			TAW (mm)
				Areia	Silte	Argila	θ <sub>FC</sub>	θ <sub>WP</sub>	θ <sub>SAT</sub>	
Sequeiro	0 – 20	1,79	2,57	72,05	14,10	13,85	0,24	0,12	0,36	24,1
	20 – 40	1,66	2,60	68,41	14,99	16,60	0,27	0,12	0,39	30,3
	40 – 60	1,40	2,57	56,23	15,94	27,82	0,35	0,14	0,48	41,7
Irigada	0 – 20	1,75	2,57	73,48	10,73	15,79	0,25	0,12	0,38	26,5
	20 – 40	1,61	2,61	54,30	19,71	25,99	0,31	0,15	0,44	31,5
	40 – 60	1,38	2,72	46,91	15,77	37,32	0,34	0,16	0,49	34,4

\*Prof. = Profundidade da camada em que a coleta do solo foi realizada (cm); Ds = Densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>); Dp = Densidade de partícula (g cm<sup>-3</sup>); θ = Conteúdo volumétrico de água (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) para θ<sub>FC</sub>: Capacidade de campo; θ<sub>WP</sub>: Ponto de murcha permanente e θ<sub>SAT</sub>: Saturação; TAW: Total de água disponível no solo.

A curva de retenção de água no solo foi realizada segundo a metodologia da EMBRAPA (1997). As amostras indeformadas foram saturadas e inicialmente submetidas às tensões de 10, 60 e 100 cm na mesa de areia para drenagem da água retida nos poros maiores. Posteriormente, aplicaram-se tensões de 33 e 100 kPa, no aparelho extrator de Richards, até as amostras atingirem o equilíbrio em cada uma das tensões. As massas das amostras foram determinadas após cada pressão utilizada e, após a tensão de 100 kPa, colocadas a secar em estufa à temperatura de 105 °C, até massa constante. O ponto de murcha permanente (conteúdo de água correspondente ao potencial de -1.500 kPa) foi estimado através de funções de pedotransferência (MICHELON et al., 2010).

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, baseado na velocidade de queda das partículas que compõem o solo. Pipetou-se um volume da suspensão, para determinação da argila que seca em estufa foi pesada. As frações de areia fina e grossa foram

separadas por tamisação, secas em estufa e pesadas para obtenção dos respectivos percentuais. O silte foi obtido pela diferença das outras frações em relação à amostra original (EMBRAPA1997). A densidade de partículas ( $D_p$ ) foi realizada pelo método do balão volumétrico, baseado no princípio da determinação do volume de álcool necessário para completar a capacidade de um balão de volume conhecido, contendo solo seco em estufa.

A cobertura do solo era de biomassa seca de trigo (*Triticum aestivum*). Para a estimativa da fração de cobertura do solo pela palha, foi utilizada a técnica do “Método do Quadrado” (EMBRAPA, 2006), uma metodologia direta (ou destrutiva), na qual foi escolhida uma área visualmente homogênea, e posicionada uma moldura fabricada de metal, de área conhecida ( $0,09 \text{ m}^2$ ). A amostragem foi realizada a partir da coleta de quatro amostras dentro da área irrigada e de sequeiro respectivamente, através do corte da palha, ao nível do solo, referente à área do quadrado. Após os cortes, as amostras foram colocadas em sacos de papel e pesadas em balança digital no laboratório do Sistema Irriga®, posteriormente a biomassa foi transferida para estufa de ventilação forçada a  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  por 48 h para determinação da massa seca, que foi de  $5 \text{ t ha}^{-1}$ .

A cultivar de soja AS 3590 IPRO, grupo de maturidade relativo 5.9, hábito e crescimento indeterminado, foi semeada em 13 de novembro de 2017, em sistema semeadura direta, utilizando-se uma população de 14 plantas por metro linear, espaçamento entrelinhas de 0,45 m, totalizando 311.000 plantas  $\text{ha}^{-1}$ . A adubação de base foi  $260 \text{ kg ha}^{-1}$  de NPK (Nitrogênio – Fósforo – Potássio), com formulação 02-23-23. As demais práticas de manejo da cultura foram feitas conforme recomendações técnicas do Engenheiro Agrônomo responsável pela área.

As informações meteorológicas foram coletadas de uma estação meteorológica automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a aproximadamente 30 km da propriedade, em Tupanciretã – RS. A evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) diária foi estimada pelo método FAO Penman-Monteith, método parametrizado como padrão pelo Boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998). O cálculo da  $ET_o$  é frequentemente informatizado, e foi realizado, portanto, em uma planilha eletrônica do *software* Excel® a partir dos dados de temperatura do ar máxima e mínima ( $^\circ\text{C}$ ), umidade relativa do ar máxima e mínima (RH, %), velocidade do vento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ) e radiação solar ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ), os quais estão apresentados na figura 2.

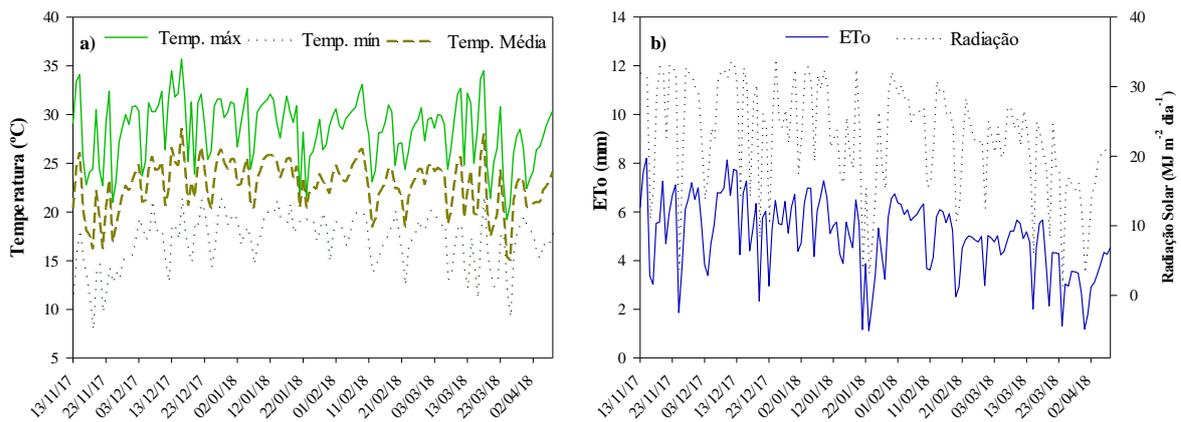


Figura 2 – Valores diários de temperatura máxima, mínima e média (°C) (a), evapotranspiração de referência ( $ET_o$ , mm) e radiação solar ( $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ ) (b), observados durante o período experimental.

A aferição da lâmina de irrigação para avaliar o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) foram realizadas antes da implantação da cultura, seguindo a normativa 14244, (ABNT, 1998). Coletores (pluviômetros) com altura e diâmetro da borda de 8 cm foram dispostos ao longo da linha lateral do pivô, em espaçamentos de 6 m. Após a coleta do volume precipitado em dois alinhamentos do pivô, os resultados foram processados, obtendo-se um CUC e CUD de 77% e 76%, respectivamente.

O conteúdo de água no solo foi monitorado em escala diária, em ambas as áreas, instalando-se uma estação de campo automática em cada área (modelo Leapod 2.0, Sistema Irriga®, RS, BRA), contendo um conjunto de três sensores de umidade do solo, um pluviômetro de balança, um sistema de aquisição e armazenamento de dados, placa solar e bateria. Os sensores utilizados foram do tipo matriz granular com resistência elétrica, tipo watermark (Irrometer, Califórnia, USA), modelo 200SS. Os sensores foram instalados na camada intermediária de 0-20, 20-40, 40-60 cm de profundidade, realizando leituras a cada minuto, sendo a média armazenada em um cartão de memória a cada quinze minutos. A cada quatro horas, os dados eram enviados para um sistema em nuvem utilizando a rede de Serviços Gerais de Pacote por Rádio (GPRS), fornecendo de forma gráfica a umidade do solo em kPa. Na área de sequeiro, não houve leituras da umidade do solo no período de 24/12/2017 à 19/01/2018, devido à problemas técnicos na estação de campo.

O manejo e gerenciamento da irrigação foi realizado pelo Sistema Irriga®. A irrigação era recomendada a partir de critérios previamente estabelecidos, combinando os dados da fração de água facilmente disponível do solo (FAD), calculada a partir da TAW (Tabela 1) e do critério de não estresse do potencial de água no solo, medido pelos sensores, para a profundidade efetiva

do sistema radicular, prevendo manter a umidade do solo acima de 60% da FAD. Lâminas brutas de irrigação de 5,37 mm foram aplicadas no início do ciclo de desenvolvimento e, após o estabelecimento pleno da cultura, foram aplicadas lâminas fixas de 12 mm. As chuvas e as irrigações aplicadas durante todo o período foram registradas usando-se pluviômetros colocados acima do dossel vegetativo da cultura, acoplados à estação de campo.

Os dados mensurados do conteúdo de água no solo em potencial foram transformados em conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta$ ), diariamente, para cada profundidade, conforme a metodologia de Van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (1)$$

Em que  $\theta_r$  é a umidade residual,  $\theta_s$  umidade na saturação,  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  são os parâmetros independentes estimados a partir dos dados observados de retenção de água no solo (Tabela 2), e  $h$  são os dados observados em potencial.  $\theta_r$  foi determinada como a umidade contida na amostra de solo, após preparada e seca ao ar. Depois da transformação dos dados, a água disponível no perfil do solo (ASW) foi calculada através da média ponderada dos valores do conteúdo volumétrico ( $\theta$ ) de água referente à cada camada, para avaliar a disponibilidade hídrica em ambas as áreas e comparar com os valores simulados de ASW pelo SIMDualKc, conforme descrito em 4.2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados para estimar o conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta$ ), referente à cada profundidade da área irrigada e de sequeiro.

Parâmetros	Irigada			Sequeiro		
	0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)	0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
$\alpha$	0,0442	0,0007	0,0003	0,1925	0,0695	0,0002
$m$	0,39	2,02	2,64	0,13	0,20	1,53
$n$	1,05	0,46	0,41	1,36	0,98	0,41
$\theta_r$	0,12	0,15	0,16	0,04	0,04	0,04
$\theta_s$	0,38	0,44	0,49	0,36	0,39	0,48

As observações de campo (fenologia e altura da cultura) foram executadas periodicamente durante todo o ciclo da cultura, marcando e identificando previamente 10 plantas dentro da área irrigada e 10 plantas dentro da área de sequeiro. A estimativa de área foliar foi realizada de forma destrutiva e com auxílio do software gratuito disponível na internet, ImageJ® (<http://rsbweb.nih.gov/ij/>) (MARTIN et al., 2013). Para isso, em cada avaliação,

coletou-se os trifólios de quatro plantas dentro da área irrigada e de sequeiro, destacando-os do caule principal, sobrepondo-os sobre papel de cartolina branco, que continha uma régua graduada de 25 cm (para calibração do software) e em seguida foram fotografadas todas as folhas das plantas. O software captura a imagem dos folíolos e através do contraste de cores espectral (sendo a folha de cor escura e fundo contrastante) e da comparação com a escala utilizada, calcula a área total da folha. A razão entre a área foliar e a superfície do solo ocupada pela planta, obtida através do espaçamento entre linhas e população de plantas, determina o índice de área foliar (IAF).

Para o cálculo da fração de cobertura do solo pelo dossel também foi utilizado o software ImageJ®, através da fotografia de duas linhas centrais da cultura, contendo no solo uma folha de papel de tamanho 21×29,7cm (A4), previamente preparada, que continha impresso um retângulo de cor preta, totalmente preenchido, medindo 28 cm de comprimento, utilizado para calibração do software, até aproximadamente 45 DAS, quando o dossel cobriu aproximadamente 80% do solo. A partir da escala utilizada foi possível calcular a área total da imagem e por diferença de cor espectral, a área correspondente ao dossel da cultura e a superfície do solo. A partir da razão entre essas áreas obteve-se porcentagem de cobertura do solo pelo dossel da cultura.

A identificação dos principais estádios fenológicos foi feita utilizando-se a escala fenológica de Fehr e Caviness (1977) e a altura de plantas foi determinada de forma não destrutiva, nas mesmas plantas usadas para a identificação dos estádios fenológicos, medindo-se a distância entre a superfície do solo e o último nó trifoliar.

Além disso, foi determinado o início dos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura para posterior utilização no modelo SIMDualKc, de acordo com Allen et al. (1998): (i) fase inicial, desde a semeadura até o dossel cobrir aproximadamente 10% do solo; (ii) fase de desenvolvimento rápido, a partir do final da fase inicial até a cultura atingir um índice de área foliar (IAF) igual a 3.0, que corresponde a cobertura plena; (iii) período intermediário, da cobertura total até o início da senescência; e, (iv) período final de desenvolvimento, desde o início da senescência até a colheita. As datas de início e duração dos estádios de desenvolvimento da cultura estão apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 - Datas dos estádios de desenvolvimento da cultura da soja conforme modelo SimDualKC. Júlio de Castilhos – RS, 2017.

Semeadura	Crescimento rápido	Período intermediário	Início da senescência	Colheita/final
		Sequeiro		
13/11/2017	09/12/2017	19/01/2018	23/02/2018	08/04/2018
		Irrigado		
13/11/2017	09/12/2017	17/01/2018	23/02/2018	08/04/2018

A medida de profundidade efetiva do sistema radicular das plantas foi realizada quando a cultura atingiu a floração plena, abrindo-se uma trincheira na área irrigada e na área de sequeiro, respectivamente, entre quatro linhas de plantas, até a profundidade de um metro. As raízes foram limpas, posteriormente colocou-se uma grade quadriculada e uma fita métrica para avaliação do comportamento do sistema radicular entre as áreas, verificando a distribuição das raízes, assim como a extensão e profundidade de enraizamento, que foi 0,6 m.

A colheita ocorreu no dia 08/04/2018, totalizando 147 dias de ciclo. Para a determinação do rendimento de grãos foram colhidas três parcelas (área útil de 9 m<sup>2</sup>) dentro da área irrigada e da área de sequeiro, próximo da estação de monitoramento da umidade do solo. As plantas foram colhidas manualmente, armazenadas em sacos de rafia em polipropileno, e transportadas posteriormente para o local onde concentraram-se os trabalhos de trilha. Após a colheita das plantas, os grãos de soja foram debulhados das vagens em máquina trilhadeira mecânica estacionária, o material foi pesado em balança de precisão no laboratório do Sistema Irriga®, para realização do cálculo de rendimento por área em kg ha<sup>-1</sup>, a partir do rendimento obtido das parcelas.

Além disso, foram selecionadas, de forma aleatória, 15 plantas por parcela de ambas às áreas, para a determinação dos componentes de rendimento, como altura de inserção da primeira vagem (cm), número de vagens por planta, número de grãos por vagem e peso de 1000 grãos. O rendimento de grãos e peso de mil sementes foram corrigidos à umidade de 13%, após medição da umidade em medidor modelo GAC500 XT, conforme Regras de Análise de Sementes.

## 4.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SIMDualKc

A calibração do modelo consistiu no ajuste dos parâmetros não observados do modelo, ( $K_{cb}$ , fração de depleção sem estresse ( $p$ ), parâmetros de evaporação de água do solo, escoamento superficial e percolação profunda), a fim de minimizar os desvios entre os valores observados e simulados de água disponível no solo para todo o perfil de solo explorado pelas raízes das plantas (ROSA et al., 2012). Os parâmetros referentes à cultura ( $K_{cb}$  e fração de depleção considerando nenhum estresse ( $p$ )), de evaporação de água no solo, profundidade da camada evaporativa ( $Z_e$ ), total de água evaporável (TEW) e água prontamente evaporável (REW) foram calculados de acordo com as características texturais do solo (ALLEN et al., 1998). Os parâmetros para estimar a percolação profunda (DP) ou ascensão capilar (CR) ( $a_D$  e  $b_D$ ) e escoamento superficial (RO) foram ajustados mediante tentativa e erro, até que as diferenças entre os valores observados e simulados fossem reduzidas, utilizando-se os indicadores estatísticos, conforme a seção 4.3. A área irrigada foi utilizada para calibrar o modelo e a validação do modelo consistiu no uso dos parâmetros já calibrados para simular a área de sequeiro. Quando os resultados para a validação não foram apropriados, o processo de calibração foi repetido novamente.

Os dados de entrada do modelo consistem em:

- (i) Dados meteorológicos diários referentes à chuva (mm), umidade relativa mínima ( $RH_{min}$ , %), velocidade do vento a 2 m de altura ( $u_2$ ,  $m\ s^{-1}$ ) e  $ET_o$  (mm) (Figura 2);
- (ii) Dados do conteúdo de água no solo na CC e PMP (Tabela 1) nas camadas exploradas pelo sistema radicular da cultura;
- (iii) Dados relativos às datas das irrigações e lâminas líquidas aplicadas, bem como a fração de molhamento do solo ( $f_w$ ) e o sistema de irrigação. A  $f_w$  utilizada foi igual a 1, por ser aspersão.
- (iv) Dados de cultura observados, como as datas dos estádios de desenvolvimento da cultura (Tabela 3), altura de plantas ( $h$ ), fração de cobertura do solo pelo dossel ( $f_c$ ) (Tabela 4) e profundidade do sistema radicular ( $Z_r$ ).
- (v) Parâmetros da cultura ( $K_{cb}$ ); do solo (fração de depleção para que não ocorra estresse), parâmetros de evaporação de água no solo como o total de água disponível no solo, água prontamente disponível no solo e profundidade da camada evaporativa; e, por fim, parâmetros para estimar a DP e RO, os quais estão apresentados na tabela 5. TEW é

calculado em função da CC e PMP na camada evaporativa e REW a partir das porcentagens de areia grossa, areia fina e argila.

- (vi) Dados opcionais de “mulch” na presença de resíduos vegetais. A fração de cobertura pela palha utilizada foi 80% (densidade média) e utilizado um fator de redução da evaporação de água do solo de 60% e 65% para a área irrigada e sequeiro, respectivamente.

Tabela 4 - Altura de plantas (h) e fração de cobertura do solo pelo dossel (fc) durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja em Júlio de Castilhos – RS.

h/fc	Semeadura	Crescimento rápido	Período intermediário	Início da senescência	Colheita/final
Sequeiro					
h (m)	0,01	0,13	0,9	1,2	1,2
fc	0,01	0,12	0,99	0,99	0,7
Irigado					
h (m)	0,01	0,13	0,7	1,2	1,2
fc	0,01	0,09	0,99	0,99	0,7

A estimativa da DP ( $\text{mm d}^{-1}$ ) foi realizada através da equação proposta por Liu et al. (2006), em que os parâmetros  $a_D$  e  $b_D$  foram calibrados (Tabela 5) de acordo com o relevo e textura do solo da área. Não se considerou a contribuição de águas subterrâneas (CR) por não haver elevação do lençol freático.

O total de água disponível no solo (TAW) é expresso pela diferença da CC e o PMP na profundidade efetiva do sistema radicular; a fração de água que pode ser extraída sem que ocorra estresse ou água prontamente disponível ( $\text{RAW} = \text{TAW}.p$ ). O valor calculado de TAW e RAW pelo modelo foi 96 mm e 48 mm para a área de sequeiro e 94 mm e 47 para a área irrigada, respectivamente.

Tabela 5 - Coeficiente de cultura basal ( $K_{cb}$ ), fração de depleção sem estresse ( $p$ ) e parâmetros de evaporação de água do solo, escoamento superficial e percolação profunda, padronizados e calibrados no SIMDualKc.

Parâmetros calibrados	Valores
$K_{cb}$ ini	0,10
$K_{cb}$ mid	1,07
$K_{cb}$ end	0,35
$p$ ini	0,5
$p$ dev	0,5
$p$ mid	0,5
$p$ end	0,5
REW (mm)	9
TEW (mm)	19
$Z_c$ (m)	0,10
CN	70
A	380
B	-0.023

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

O  $K_{cb}$  foi estimado a partir do IAF e altura da cultura, conforme a equação (2) proposta por Allen e Pereira (2009):

$$K_{cb} = K_{c \text{ min}} + K_d (K_{cb \text{ full}} - K_{c \text{ min}}) \quad (2)$$

Onde  $K_d$  é o coeficiente de densidade,  $K_{cb \text{ full}}$  é o  $K_c$  basal estimado durante o pico de crescimento da planta para condições de cobertura quase total do solo (ou  $IAF > 3$ ), e  $K_{c \text{ min}}$  expressa o  $K_c$  basal mínimo para solo descoberto, sendo utilizado um valor de 0,15 para culturas agrícolas. O  $K_d$  foi estimado em função do IAF, podendo ser estimado também a partir da fração de cobertura do solo:

$$K_d = (1 - e^{-0,7 IAF}) \quad (3)$$

Em contrapartida, o  $K_{cb \text{ full}}$  é estimado a partir dos valores de  $K_{cb}$  tabulados na FAO56, ajustando-se a RH min à 45% e velocidade média do vento a 2 metros de altura ( $u_2 = 2 \text{ m s}^{-1}$ ).

O modelo calcula um balanço hídrico diário na zona radicular do solo, expresso em depleção no final do dia (ALLEN et al., 1998), expresso por:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P-RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (4)$$

Onde  $D_{r,i}$  e  $D_{r,i-1}$  é a depleção da zona radicular (mm) no final do dia  $i$  e  $i - 1$ , respectivamente;  $P_i$  é a chuva;  $ROI$  é o escoamento superficial;  $I_i$  refere-se a irrigação;  $CR_i$  é a capilaridade;  $ET_{c,i}$  é a evapotranspiração da cultura e  $D_{p,i}$  é a percolação profunda, todas referindo-se ao dia  $i$ , expressos em mm.

Os dados de saída incluem a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), que determina os efeitos da evaporação do solo e transpiração da cultura, através dos coeficientes  $K_e$  e  $K_{cb}$ , respectivamente:

$$ET_c = (K_{cb} + K_e)ET_o \quad (5)$$

Em que o  $K_e$  é calculado usando o modelo de evaporação do solo de dois estágios de Ritchie (1972), descrito por Allen et al. (1998, 2005b). Na ocorrência de estresse hídrico, os efeitos são descritos pela multiplicação do coeficiente de cultura basal pelo coeficiente de estresse hídrico  $K_s$  [0-1]. O coeficiente de estresse hídrico do solo ( $K_s$ ) é expresso como uma função linear da depleção da zona radicular quando a depleção excede a água prontamente disponível na zona radicular efetiva (ROSA et al., 2012a), resultando em:

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_r}{(1-p)TAW}, \text{ para } D_r > RAW \quad (6a)$$

$$K_s = 1 \text{ para } D_r \leq RAW \quad (6b)$$

Por fim, a variação do conteúdo de água no solo (ASW) foi expressa em lâmina d'água ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) e comparada com os resultados observados no campo. O ajuste entre os valores observados e simulados foi realizado até se obter uma correlação adequada entre os valores de ASW observados e simulados.

#### 4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A qualidade do ajuste do modelo SIMDualKc às observações foi avaliada através dos indicadores listados a seguir e descritos em Rosa et al. (2012b) e em Zhao et al. (2013): (i) coeficiente de regressão (b); (ii) coeficiente de determinação ( $R^2$ ); (iii) erro quadrado médio

(RMSE); (iv) erro médio absoluto (AAE); (v) erro médio relativo (ARE); (vi) eficiência da modelagem (EF); (vii); (viii) cálculo da porcentagem de viés (PBIAS).

A avaliação da performance do modelo foi feita mediante regressão linear forçada à origem entre dados observados e simulados do ASW, utilizando-se tanto o coeficiente linear ( $b_0$ ), como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) como indicadores. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indica se a maior parte da variância total dos valores foi explicado pelo modelo, variando de 0 a 1, com valores mais altos indicando menor variação de erro (MORIASI et al., 2007).

Vários índices de erro são comumente utilizados na avaliação de modelos, incluindo o quadrado médio do erro (RMSE), o qual caracteriza a variância dos erros, erro médio absoluto (AAE), e erro médio relativo (ARE), ambos expressam o tamanho da estimativa dos erros em termos absolutos e relativos respectivamente. Valores de RMSE, AAE e ARE iguais a 0 indicam um ajuste perfeito.

A qualidade da modelagem foi avaliada através da eficiência de modelagem (EF) proposta por Nash e Sutcliffe (1970), utilizada para determinar a magnitude relativa da variação residual em comparação com a variância dos dados observados. Valores entre 0 e 1 são geralmente vistos como níveis aceitáveis de desempenho, enquanto valores  $\leq 0$  indicam que o valor observado é melhor do que o valor simulado, indicando um desempenho inaceitável (MORIASI et al., 2007).

A porcentagem de viés (PBIAS) mede a tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores do que os valores observados (GUPTA et al., 1999). O valor ideal do PBIAS é 0, ou seja, valores de baixa magnitude indicam que a simulação de modelo foi precisa, enquanto que, valores positivos indicam tendência de superestimação do modelo e valores negativos de subestimação do modelo.

#### 4.4 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA E INDICADORES DO USO DA ÁGUA

A fim de analisar o uso água, foram utilizados indicadores de produtividade da água WP ( $\text{kg m}^{-3}$ ), expresso pela razão entre o rendimento da cultura ( $Y_a$ ) e a correspondente água utilizada (PEREIRA et al., 2012). A produtividade total da água refere-se ao uso total de água (TWU,  $\text{m}^3$ ), incluindo tanto a chuva como a irrigação ( $\text{m}^3$ ), somado à variação do ASW inicial e final, obtidas através da medição e estimativa dos componentes do balanço hídrico do solo. Considerando-se apenas o uso da água da irrigação resulta na produtividade da água irrigada (IWU,  $\text{kg m}^{-3}$ ); a fração de uso benéfico da água (BWU) considera a fração da TWU que é

usada para produzir o rendimento real, ou seja a transpiração da cultura ( $T_{c \text{ act}}$ ), logo, tem-se os seguintes os indicadores:

$$WP = \frac{Y_a}{TWU} \quad (7)$$

$$WP_{\text{Irrig}} = \frac{Y_a}{IWU} \quad (8)$$

$$WP_{\text{BWU}} = \frac{Y_a}{BWU} \quad (9)$$

A WP pode ser considerada não apenas em termos físicos, como acima, mas também em termos econômicos, tendo em vista que o benefício da produção agrícola se torna mais visível quando expressa em termos monetários. Assim, a produtividade econômica da água (EWP, US\$ m<sup>-3</sup>) é considerada como a relação entre o valor monetário obtido pelo rendimento obtido ( $Y_a$ , kg) e o TWU (m<sup>-3</sup>):

$$EWP = \frac{\text{Valor}(Y_a)}{TWU} \quad (10)$$

$$EWP_{\text{Irrig}} = \frac{\text{Valor}(Y_a)}{IWU} \quad (11)$$

$$EWP_{\text{BWU}} = \frac{\text{Valor}(Y_a)}{BWU} \quad (12)$$

A soja é uma commodity negociada na Bolsa de valores de Chicago. Para o cálculo da EWP, o preço considerado na CBOT foi referente à data da comercialização, sendo a cotação 1 US\$ equivalente R\$ 3,74 BRL (real brasileiro), sendo assim, a tonelada da soja valia US\$ 356,58 t<sup>-1</sup>(R\$ 1333,6 t<sup>-1</sup> – BRL).

#### 4.5 PREDIÇÃO DO RENDIMENTO

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

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \left( 1 - \frac{T_{cact}}{T_c} \right) \quad (13)$$

Onde,  $Y_a$  corresponde ao valor de grãos secos observados. O valor de  $Y_m$  utilizado no presente estudo foi obtido a partir da média do rendimento máximo observado de 3560 kg ha<sup>-1</sup>, na área irrigada, onde não houve nenhum estresse. Esses valores ( $Y_m$ ) foram ainda comparados com aqueles estimados pelo método de Wageningen (DOORENBOS & KASSAM, 1979) e verificando os resultados em relação aos rendimentos máximos obtidos pelos melhores agricultores (GRASSINI et al., 2015). O valor de  $K_y$  é específico de cada cultura, sendo  $K_y < 1$ : quando a cultura é mais tolerante ao déficit hídrico e se recupera parcialmente do estresse;  $K_y > 1$ : a resposta da cultura é muito sensível ao déficit hídrico;  $K_y = 1$ : a redução de rendimento é diretamente proporcional ao uso reduzido de água (STEDUTO et al., 2012).

Após conhecidos o  $K_y$  e  $Y_m$ , as previsões de rendimento podem ser realizadas resolvendo a equação (13) em relação a  $Y_a$  para todos os resultados do  $T_{cact}$  obtidos pelo SIMDualKc. Desde que a transpiração da cultura for estimada com precisão e o fator de resposta de produção empírico  $K_y$  calibrado e validado corretamente com os rendimentos observados. Sendo assim, a validação da abordagem Stewart-SIMDualKc foi realizada em relação às diferenças de rendimento observadas na área em estudo, sendo a qualidade da abordagem avaliada pelos indicadores estatísticos  $R^2$ ,  $b_0$ , RMSE e EF conforme descrito em 4.3.

Para isso a colheita foi georreferenciada com o auxílio de colhedora (Model CR9090, New Holland, USA), a qual possui um conjunto de ferramentas, como sensores de rendimento, cartão de armazenamento de dados para posterior análise, juntamente com uma antena receptora de GPS, os quais permitem a obtenção do mapa de rendimento. A partir dos valores de rendimento extraídos da colhedora foram definidos intervalos de acordo com o algoritmo geoestatístico de séries temporais de Box e Jenks (JENKS, 1967), presente no QGIS (versão 2.18.260). O algoritmo tem como objetivo realizar agrupamentos entre os dados de acordo com a sua distribuição, para encontrar o melhor arranjo entre as classes criadas, diminuindo a variação dentro de cada classe e aumentando a variação entre as classes. O mapa de rendimento

obtido não foi uniforme para toda a área, uma vez que foram utilizadas duas colhedoras, mas somente uma delas continha o equipamento de mapeamento.

No entanto, levando-se em consideração a dificuldade de métodos que dependem da instalação de sensores em grandes áreas, e conseqüentemente, a estimativa do  $K_{cb}$  para cada rendimento observado dentro da área, o  $K_{cb}$  foi estimado através de índices de vegetação ( $K_{cb}$  VI).

#### 4.5.1 Coeficientes de cultura basais derivados do índice de vegetação de refletância

Os índices de vegetação utilizados para estimar os coeficientes de cultura basal foram obtidos das imagens do satélite Sentinel 2 (European Space Agency, 2015) e processadas através da plataforma Google Earth Engine. É o satélite de domínio público com melhor capacidade para a observação de áreas de cultivo, equipado com sensores que capturam a faixa do infravermelho próximo e do espectro visível, sendo possível avaliar as mudanças que ocorrem no dossel vegetativo. O índice utilizado para analisar as diferenças na vegetação foi o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). O processamento das imagens do sensoriamento remoto foi realizado através do cálculo ( $NDVI = NIR-RED/NIR+RED$ ) sobre as imagens nas bandas do vermelho (RED, 665nm, banda B4) e infravermelho próximo (NIR, 842nm, banda B8), processadas com os índices de vegetação e analisadas para o período experimental, em função da disponibilidade de imagens e da cobertura de nuvens.

Foram selecionadas 22 imagens para formar o conjunto de dados, considerando que, as áreas irrigada e de sequeiro foram delimitadas por geometrias, com o intuito de desconsiderar valores de NDVI mesclados com estradas, área de preservação ambiental ou outras áreas afins que pudessem interferir na representatividade do pixel (PÔÇAS et al., 2015b). A metodologia considera a relação entre o NDVI com um coeficiente de densidade ( $K_d$ ) e o menor coeficiente de cultura para solo nu ( $K_{c\ min}$ ), conforme a equação (ALLEN & PEREIRA, 2009):

$$K_{cb\ VI} = K_{c\ min} + K_d \left( \frac{VI_i - VI_{min}}{VI_{max} - VI_{min}} \right) \quad (14)$$

Onde  $VI_i$  corresponde ao VI para uma data específica e pixel,  $VI_{max}$  é o VI para cobertura vegetal máxima e  $VI_{min}$  é VI para cobertura vegetal mínima (solo nu). O  $K_d$  (Equação 14) é

calculado através da equação abaixo, a qual utiliza a fração efetiva do solo coberto estimado a partir do índice de vegetação ( $f_{c\ VI}$ ):

$$K_d = \min \left( 1, M_L f_{c\ eff}, f_{c\ eff} \left( \frac{1}{1+b} \right) \right) \quad (15)$$

$$f_{c\ VI} = \beta_1 \left( \frac{VI_i - VI_{\min}}{VI_{\max} - VI_{\min}} \right) + \beta_2 \quad (16)$$

O parâmetro  $\beta_1$  representa um coeficiente empírico, variando de 0 a 1, com base no valor máximo do índice de vegetação para cada estágio de crescimento da planta.  $\beta_2$  é um fator de ajuste considerado para compensar a queda dos valores do índice de vegetação devido ao amarelamento das folhas, que é independente da  $f_c$ .  $VI_i$  representa cada um dos valores de NDVI para cada pixel, variando de 0 a 100.  $VI_{\max}$  e  $VI_{\min}$  são os valores máximo e mínimo do índice de vegetação para toda a área avaliada, respectivamente.

A equação 14 foi utilizada para calcular o  $K_{cb\ VI}$ , para as 22 imagens disponíveis (Tabela 6), sendo o VI calculado em uma base pixel a pixel, ou seja, combinando cada ponto geográfico de intersecção entre o mapa de rendimento e o pixel da imagem de satélite para toda a área de estudo, de forma a distribuí-lo espacialmente. Baseado na classificação dos intervalos de rendimento, utilizando séries temporais, foi gerado então o  $K_{cb\ VI}$  para um conjunto de dados da área irrigada, totalizando 7485 pontos (11 ha), e de sequeiro 5671 pontos (6 ha). No entanto, para a predição do rendimento foram utilizados apenas os valores de  $K_{cb\ VI}$  referentes à área de sequeiro, pois espera-se relacionar o rendimento com a  $T_c$  apenas onde ocorreu déficit hídrico, e selecionados os valores de  $K_{cb\ VI}$  inicial, médio e final, dentro das 22 datas de acordo com o período de crescimento, referente à cada rendimento observado no mapa.

Tabela 6 – Datas das imagens analisadas com os respectivos períodos de desenvolvimento da cultura para a área irrigada e de sequeiro.

Data	Irigado	Sequeiro	Data	Irigado	Sequeiro
19/11/2017	1	1	31/01/2018	3	3
22/11/2017	1	1	07/02/2018	3	3
24/11/2017	1	1	15/02/2018	3	3
29/11/2017	1	1	27/02/2018	3	3
09/12/2017	2	2	02/03/2018	3	3
12/12/2017	2	2	07/03/2018	3	3
19/12/2017	2	2	09/03/2018	4	4
22/12/2017	2	2	12/03/2018	4	4
29/12/2017	3	3	17/03/2018	4	4
03/01/2018	3	3	22/03/2018	4	4
08/01/2018	3	3	06/04/2018*	4	4

\*Estágios de desenvolvimento da cultura de acordo com o número: (1) inicial; (2) crescimento rápido; (3) período intermediário e (4) final.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SIMDualKc

A simulação da dinâmica da água no solo mediante a comparação da ASW observada versus a simulada pelo modelo, ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, é apresentada na figura 3. Os resultados demonstram condições levemente diferentes para as duas situações; como era esperado, não houve déficit hídrico na área irrigada (Fig. 3a), tendo em vista que o manejo da irrigação previa manter a umidade do solo acima de 60% do valor da TAW, consumindo menos em água sem afetar o rendimento das culturas, considerando que, o conteúdo de água no solo no momento da semeadura era adequado. Ao longo do ciclo de cultivo foram realizadas 13 irrigações de forma suplementar, totalizando 128 mm. Assim, a ASW manteve-se sempre acima da RAW. Na área de sequeiro (Fig. 3b), utilizada para a validação, a ASW permaneceu acima da RAW durante quase todo o período, ocorrendo apenas alguns períodos de déficit hídrico, que reduziram a ASW próximo da RAW.

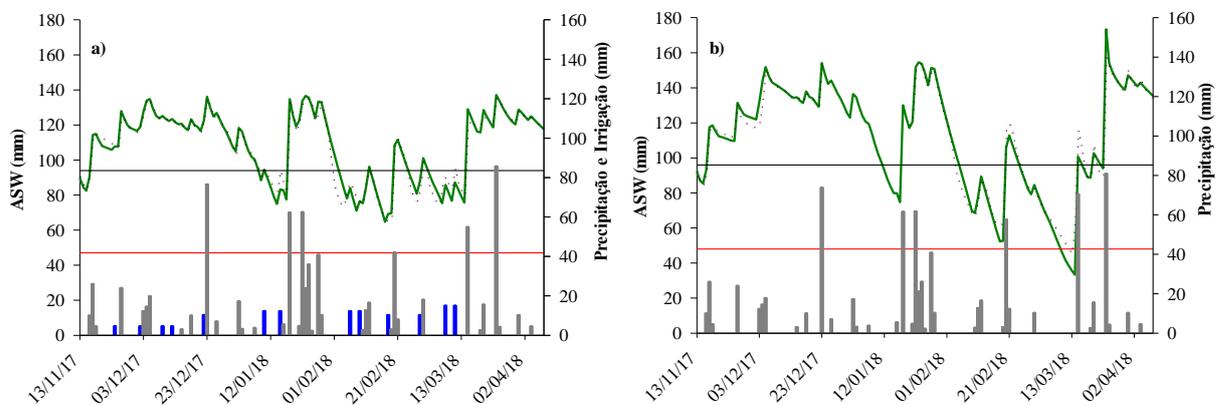


Figura 3 – Variação diária entre a água disponível no solo (ASW, mm) observada e simulada, na área irrigada (a) e de sequeiro (b), sendo (●) dados observados e (—) dados simulados. As linhas horizontais representam o total de água disponível no solo (—, TAW, mm) e a água prontamente disponível no solo (—, RAW, mm), com precipitações (—, mm) e irrigações (—, mm) ao longo do ciclo da soja, em Júlio de Castilhos – RS.

A chuva total ocorrida durante o ciclo de desenvolvimento na área irrigada foi de 818 mm, distribuída em 37 eventos, fazendo com que a umidade do solo permanecesse acima da  $\theta_{FC}$  em praticamente todo o período entre a semeadura e período intermediário de desenvolvimento. Lâminas mínimas de irrigação foram feitas no estágio inicial e crescimento rápido, devido a diminuição da umidade na camada superficial do solo, visando o adequado estabelecimento da cultura. No estágio de desenvolvimento intermediário houve uma

diminuição tanto no total, como no número de dias com chuva (29/01 a 09/02), para ambas às áreas, totalizando 12 dias sem chuva. A fase intermediária é caracterizada como a de maior consumo, pois tanto a altura de plantas como o IAF atingem valores máximos nessa fase, como pode ser observado na figura 4, incrementando a capacidade transpiratória e, conseqüentemente, a demanda hídrica da cultura, período que demandou três irrigações suplementares (35 mm).

Entre os dias 02/03 e 14/03, período correspondente à senescência, a respectiva curva da ASW ficou no limite da RAW na área de sequeiro (Figura 3b), após 13 dias sem chuva e uma  $ET_0$  média de  $5 \text{ mm d}^{-1}$ , indicando assim, a ocorrência de déficit hídrico leve, tendo em vista que o armazenamento de água no solo foi reduzido em 53%. Estudos indicam que a produtividade da soja não é substancialmente afetada até que o conteúdo de água no solo na profundidade efetiva do sistema radicular mantenha-se abaixo de 60% da TAW, desde que o desenvolvimento da parte aérea não tenha sido prejudicado por déficits prolongados de água durante o período vegetativo (STEDUTO et al., 2012).

Situação similar foi obtida por Giménez et al. (2017) para a soja no Uruguai, em que o tratamento suprido apenas pela água da chuva sofreu um estresse hídrico menor em relação à imposição de irrigação deficitária durante o período vegetativo até o enchimento de grãos, pois ao contrário do último, a chuva não foi evitada durante nenhum período, sofrendo apenas um estresse durante a formação das vagens. Da mesma forma, no estudo de Wei et al. (2015) em relação à soja cultivada na China, devido às chuvas abundantes durante todo o período de crescimento, a curva da ASW manteve-se sempre acima da RAW, apenas com estresses leves e curtos por alguns dias na fase intermediária do ciclo. Apesar da cultura ser tolerante a curtos períodos de déficit hídrico na fase vegetativa, reduções no conteúdo de água do solo durante o período reprodutivo implicam em reduções no rendimento (FOROUD et al., 1993).

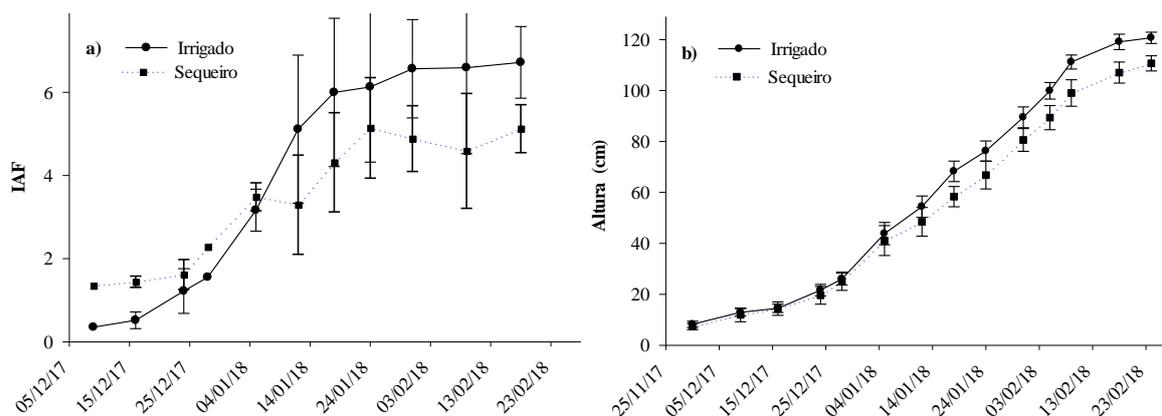


Figura 4– Evolução do índice de área foliar (IAF), figura (a), e da altura (cm), figura (b), observados entre o período inicial e o desenvolvimento máximo da cultura, na área irrigada e de sequeiro – Júlio de Castilhos – RS. As barras verticais representam o desvio padrão entre as médias.

Os resultados dos valores da ASW observada e simulada apresentaram boa associação, de acordo com os indicadores estatísticos apresentados na tabela 7. Os coeficientes de regressão ( $b_0$ ) foram iguais a 1, em ambas as áreas, indicando que a ASW simulada pelo modelo foi estatisticamente similar às observações de água no solo, não havendo tendência de sub ou superestimação da ASW. Consequentemente o PBIAS foi de baixa magnitude, confirmando que não houve tendências à sub ou superestimação. Os coeficientes de determinação variaram de 0,96 para a calibração e 0,99 para a de sequeiro (validação), significando que a maior parte da variância pode ser explicada pelo modelo.

Tabela 7 – Indicadores estatísticos relativos ao conteúdo de água no solo (ASW) da cultura da soja, em área irrigada e de sequeiro com base nas simulações utilizando o modelo SIMDualKc.

Área	$b_0$	$R^2$	RMSE (mm)	RMSE/TAW (%)	AAE (mm)	ARE (%)	EF	PBIAS
Irigada	1,00	0,96	4,16	4,43	2,59	2,79	0,95	-0,13
Sequeiro	1,00	0,99	4,85	5,05	3,02	3,52	0,99	0,24

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

As estimativas dos erros foram baixas, com RMSE de 4,16 mm na área irrigada e 4,85 mm na área de sequeiro, representando aproximadamente 4,43% e 5,05% da TAW respectivamente, indicando que o modelo pode ser usado como ferramenta de manejo da irrigação em nível de propriedade rural. O AAE foi de 2,59 e 3,02 mm para as respectivas áreas e os valores de ARE não excederam 4% (Tabela 7). A eficiência da modelagem (EF) foi alta,

com valores de 0,95 e 0,99, indicando que a magnitude relativa da variância residual é comparável à da variância dos dados medidos (MORIASI et al., 2007), portanto, o modelo é eficiente para prever a dinâmica da água no solo. Indicadores estatísticos semelhantes foram obtidos por Paredes et al. (2018) para uma área irrigada e outra mantida apenas pela água chuva ( $b_0= 1; 0,99$ ,  $R^2= 0,93; 0,95$  e  $EF= 0,87; 0,95$ ) e por Pereira et al. (2015), em que obteve PBIAS igual a -0,9 e EF de 0,9.

A relação entre os dados observados e simulados da ASW, para a soja irrigada e de sequeiro (Figura 5), demonstram que a distribuição dos resíduos é homoscedástica, ou seja, que a distribuição dos resíduos mantém uma frequência de padrão regular. Pode-se observar que os pares  $P_i-O_i$  estão próximos da linha 1:1, com menos de 4% dos dados que não podem ser explicados pelo modelo. Esse resultado está de acordo com Pereira et al. (2018), em que os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) estão acima de 0,8, indicando que há uma dispersão dos pares  $P_i-O_i$  em torno da linha 1:1, ou seja, uma fração inferior a 20% dos casos não pode ser explicada pelo modelo.

Para uma adequada calibração e validação de modelos de balanço de água no solo, é importante que os dados de água no solo usados na calibração sejam diferentes daqueles utilizados para a validação da simulação ou, preferencialmente, de anos agrícolas e locais diferentes. Essa condição é especialmente importante quando os eventos de molhamento do solo são frequentes, como no presente estudo. Em geral, os indicadores de qualidade do ajuste (Tabela 7) mostram que a abordagem do modelo SIMDualKc foi apropriada, sendo capaz de prever a variação da disponibilidade de água no solo, como também relatado por Zhao et al. (2013), Paredes et al. (2014), Pereira et al. (2015), Wei et al. (2015), Giménez et al. (2017) e Paredes et al. (2018). No Brasil, as aplicações bem-sucedidas foram realizadas por Paredes et al. (2018) para Tifton 85, Martins et al. (2013) e Ávila (2017), para a cultura do milho e Báez (2017) para a cultura da soja.

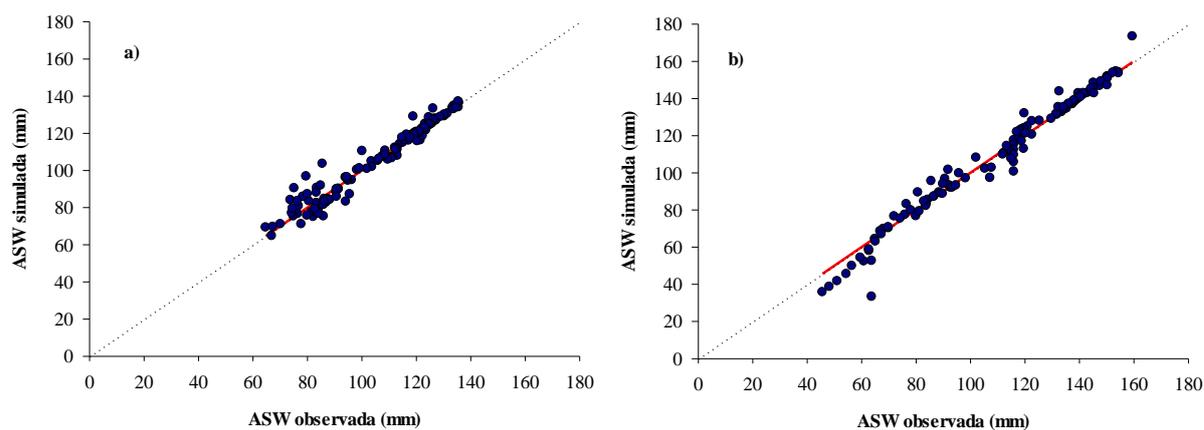


Figura 5 – Comparação entre os dados de água disponível no solo (ASW, mm), observados e simulados pelo modelo SIMDualKc para a cultura da soja, nas áreas irrigada (a) e de sequeiro (b).

## 5.2 DINÂMICA DOS COEFICIENTES DE CULTURA

Os valores de coeficiente de cultura basal ( $K_{cb}$ ) encontrados no presente estudo, foram 0,10, 1,07 e 0,35 para  $K_{cb}$  inicial, médio e final, respectivamente (Tabela 5). As curvas do  $K_{cb}$ , coeficiente de cultura basal ajustado ( $K_{cb\ adj}$ ), coeficiente de evaporação ( $K_e$ ), e coeficiente de cultura ajustado ( $K_{c\ act}$ ) estão representadas na figura 6 para a área irrigada (a) e de sequeiro (b). Os valores do  $K_e$  foram elevados durante o período inicial do ciclo (Figura 6a e 6b), devido à combinação de frequentes eventos de chuva mais irrigação, especialmente as lâminas mínimas aplicadas durante o início do ciclo de cultivo visando o estabelecimento da cultura, e a rápida decomposição dos resíduos culturais na superfície do solo. Com isso, a ação dos fatores atmosféricos como velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa do ar, intensificaram o processo de  $E_s$ , confirmando o exposto por Allen et al. (2005b). No decorrer do ciclo de cultivo, quando a transpiração excede a evaporação do solo durante as fases intermediária e final, o coeficiente de evaporação foi reduzido.

O valor de  $K_{cb\ ini}$ , que representa a transpiração de uma cultura em seu período inicial, foi menor que aquele recomendado por Allen et al. (1998) para leguminosas, porém, próximo dos valores ajustados por Wei et al. (2015), para a cultura da soja em diferentes tratamentos com déficit no Norte da China.

O  $K_{cb\ mid}$  (relacionado ao coeficiente ligado à transpiração na fase intermediária) relaciona-se com a cobertura do solo pelo dossel, arquitetura das folhas e altura do dossel. Nessa fase, o  $K_{cb\ mid}$  atinge seu valor máximo e constante, até a planta iniciar a senescência. Sendo assim, o  $K_{cb\ mid}$  estimado pela equação (2), que calcula o  $K_{cb}$  a partir do IAF da altura da cultura e do  $K_{cb\ full}$  (ou máximo), resultou em um valor de 1,07. A proximidade do valor calibrado em

relação ao proposto pela FAO 56 ( $K_{cb\ mid} = 1,10$ ) demonstra que a equação proposta é válida para estimar o  $K_{cb}$  a partir das observações de campo. Uma aplicação recente e bem-sucedida dessa equação proposta por Allen & Pereira (2009) foi realizada por Pereira et al. (2018).

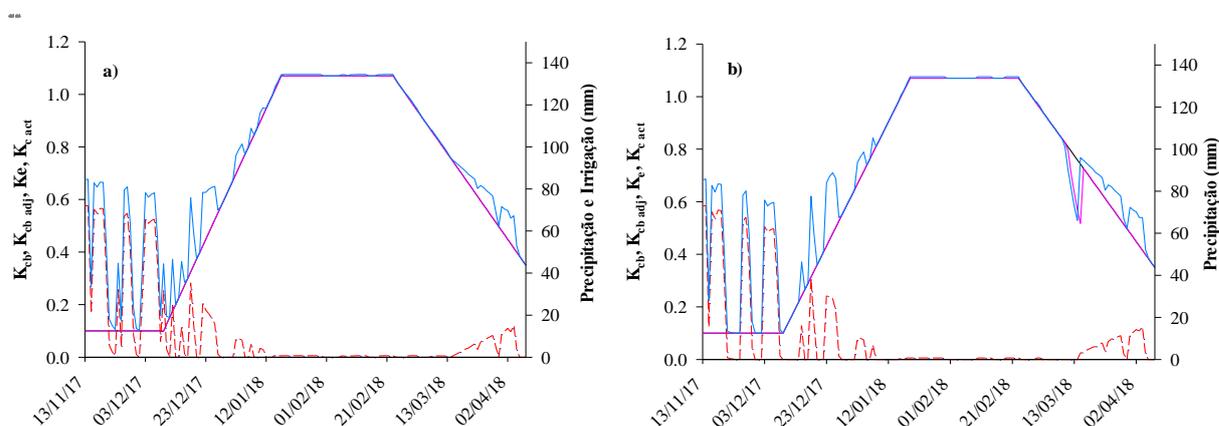


Figura 6 – Variação diária do coeficiente de cultura basal ( $K_{cb}$ , —), coeficiente de evaporação ( $K_e$ , - -), coeficiente de cultura ajustado ( $K_{c\ act}$  —), e coeficiente de cultura basal ajustado ( $K_{cb\ adj}$ , —), com precipitações (—, mm) e irrigações (—, mm) ao longo do ciclo da cultura da soja, para a área irrigada (a) e de sequeiro (b), – Júlio de Castilhos, RS.

Os valores de  $K_{cb\ mid}$  também são coerentes com os coeficientes de cultura simples relatados por Karam et al. (2005) e Tabrizi et al. (2012), onde  $K_{c\ mid}$  foi igual a 1. Assim, os resultados referentes aos valores potenciais de  $K_{cb}$  confirmam aqueles propostos por Allen et al. (1998), podendo ser utilizados na região central do Rio Grande do Sul.

Os valores de  $K_{cb\ end}$  foram de 0,35, valor este aproximado ao proposto por Allen et al. (1998) e idêntico ao encontrado por Wei et al. (2015) para soja. O  $K_{cb\ end}$  é dependente do manejo da cultura e da condição da superfície do solo no momento da colheita. Odhiambo & Irmak (2012), relataram  $K_{cb\ ini}$ ,  $K_{cb\ mid}$  e  $K_{cb\ end}$ , respectivamente, de 0,15; 1,08 e 0,33, Wei et al. (2015) de 0,15; 1,05 e 0,35, que estão muito próximos dos resultados obtidos nesse estudo (Tabela 5). Entretanto, os valores encontrados por Giménez et al. (2017), foram iguais aos propostos por Allen et al. (1998).

A curva de  $K_{cb\ adj}$  representa os valores do coeficiente de cultura basal ajustados pelo coeficiente de estresse ( $K_s$ ). Encontrou-se  $K_s < 1$  no período de 10/03 a 14/03, fase final de cultivo (Figura 6b). Na área de sequeiro, a curva do  $K_{cb\ adj}$  (—) é coincidente com a curva do  $K_{cb}$  (—), salvo no período pontual em que ocorreu estresse hídrico, onde a curva do  $K_{cb\ adj}$  permanece abaixo da curva do  $K_{cb}$ . O coeficiente de cultura ( $K_c$ ) ajustado para as condições desse estudo ( $K_{c\ act} = K_{cb} \cdot K_s + K_e$ ) indica a não ocorrência de estresse hídrico na área irrigada

(Figura 6a), pois o mesmo se manteve acima da curva do  $K_{cb}$  durante todo o ciclo e um leve estresse na área de sequeiro (Figura 6b).

O incremento do  $K_{c\ act}$  após cada evento de chuva ou irrigação, evidencia a influência do componente  $E_s$  nesse coeficiente e, eventualmente, da evaporação a partir do dossel umedecido (MARTIN et al., 2012). Da mesma forma, seu decréscimo é um reflexo do estresse hídrico nas plantas, evidenciado pelo aumento no  $K_s$ . Payero e Irmak (2013), encontraram valores de  $K_c$  variando de 1,07 a 1,23, entre a 10 e 12ª semana de cultivo da soja no Norte do Nebraska. Outrossim, as curvas do  $K_c$  mostram uma grande variabilidade no período inicial devido a variação do  $K_e$ .

### 5.3 COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA

Os componentes do balanço hídrico simulados pelo modelo SIMDualKc, para ambas às áreas, estão apresentados na tabela 8. As diferenças na  $ET_c$  entre as áreas irrigadas e de sequeiro foram mínimas (redução de 3,2% na área de sequeiro), e uma média de  $ET_c$  diária de 3,6 e 3,44 mm, respectivamente. No Rio Grande do Sul, Berlato e Bergamaschi (1979) obtiveram um consumo médio diário em relação à cultura da soja de 5,8 mm para a cultivar Bragg, já Oliveira et al. (2016) encontraram uma  $ET_c$  média de  $3,3\text{ mm}^{-1}$  para a cultivar Fundacep 53RR em Cruz Alta (RS).

Os resultados do balanço hídrico demonstram que o total de chuva foi superior à  $ET_{c\ act}$ . Entretanto, devido a intensidade e frequência das chuvas (Figuras 6a e b), aproximadamente 44 e 27% da chuva resultou em perda por percolação profunda (DP), no irrigado e sequeiro, respectivamente. A menor DP na área de sequeiro se deve ao fato da umidade do solo nessa área ser menor em curtos períodos do ciclo, apresentando, portanto, maior infiltração e armazenamento de água. Resultado similar foi obtido por Paredes et al. (2018) para a cultura da cevada, onde 45% da chuva foi perdida sob irrigação total.

A variação do conteúdo de água no solo ( $\Delta ASW$ ) entre o início e o final do ciclo foi negativa, significando que no início do ciclo de cultivo a ASW estava menor que ao final do ciclo, sendo menor a variação na área irrigada devido a maior frequência de molhamento do solo e naturalmente menor na área de sequeiro. A  $\Delta ASW$  representou 2,6% do total de uso da água (TWU) na área irrigada e 5% da TWU na área de sequeiro. Perdas por escoamento superficial representaram 7% e 3,3% em relação à chuva nas áreas irrigada e de sequeiro,

respectivamente, principalmente em função do volume de chuva elevado ocorrido em alguns eventos durante o ciclo, e das características texturais da área (Tabela 1, seção 4.1, de Materiais e Métodos), onde solos com teores mais elevados de areia e silte, por apresentarem menor resistência à desagregação, são mais suscetíveis ao escoamento superficial das águas.

Tabela 8 - Componentes do balanço hídrico referentes à área irrigada e de sequeiro em Júlio de Castilhos, RS.

Área	Irrigação	Precipitação	Percolação profunda	Escoamento superficial	$\Delta$ ASW	$ET_c$ act
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Irigada	128	817,8	330,8	57,5	-23,6	533,9
Sequeiro	0	790,6	208,4	26,3	-39,6	516,3

A razão de evaporação do solo e  $ET_c$  ( $E_s/ET_c$ , %) para cada estágio de desenvolvimento da cultura está apresentada na tabela 9. Em sistemas agrícolas de produção vegetal se objetiva maior participação percentual da  $T_c$  na  $ET_c$ , demonstrando maior aproveitamento da água utilizada. Os resultados observados no ajuste do modelo possibilitaram o cálculo da  $ET_c$ , fracionando-a em  $E_s$  e  $T_c$ , demonstrando que a partição da evapotranspiração das culturas utilizando a abordagem do coeficiente de cultura dual no SIMDualKc foi apropriada. A  $ET_c$  act estimada pelo modelo SIMDualKc para a área irrigada e de sequeiro foi de 534 e 517 mm. A  $T_c$  foi de 470 e 462 mm, respectivamente. Os valores de  $T_c$  foram superiores aos resultados encontrados por Zhao et al. (2013), Wei et al. (2015), Pereira et al. (2015), onde a média da transpiração ficou em torno de 200 mm.

Os resultados também demonstram que a evaporação do solo ( $E_s$ ) é o principal componente responsável pela  $ET_c$  durante o período inicial do ciclo de desenvolvimento das culturas, representando aproximadamente 76% e 72% da perda de água nesse subperíodo para as áreas irrigada e de sequeiro, respectivamente. Sendo que a  $E_s$  simulada pelo modelo SIMDualKc durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura foi de 64 mm e 55 mm para essas áreas. A maior  $E_s$  foi observada na área irrigada devido aos frequentes ciclos de umedecimento do dossel pela irrigação. A  $E_s$  é maior no período inicial pois, mesmo que o solo estivesse coberto por palha, a fração de cobertura pelo dossel vegetativo ainda era baixa, devido a cultura estar no início do seu ciclo de desenvolvimento. À medida que a cultura cresce, a fração de cobertura e altura da cultura aumentam, assim como o IAF (Figura 4), diminuindo progressivamente a  $E_s$ , devido a redução do  $K_e$  e aumentando a  $T_c$ , conforme representado na figura 7.

Tabela 9 – Evaporação de água do solo ( $E_s$ , mm) e transpiração da cultura ( $T_c$ , mm) em cada estágio de desenvolvimento da cultura da soja (2017/18), para a área irrigada e de sequeiro em Júlio de Castilhos, RS.

Área	Inicial (mm)		Desenvolvimento (mm)		Intermediário (mm)		Final (mm)		Ciclo total (mm)		
	$T_{c\ act}$	$E_s$	$T_{c\ act}$	$E_s$	$T_{c\ act}$	$E_s$	$T_{c\ act}$	$E_s$	$T_{c\ act}$	$E_s$	$ET_c$
Irigada	15	48	131	11	193	0,7	131	4	470	64	534
$E_s/ET_c$ (%)	24,4	75,6	92	8,0	99,6	0,4	97,1	2,9	88,1	11,9	100
Sequeiro	15	40	137	9,8	181	0,5	128,5	4,4	462	55	517
$E_s/ET_c$ (%)	27,7	72,3	93,3	6,7	99,7	0,3	96,7	3,3	89,4	10,6	100

No período de desenvolvimento ou crescimento vegetativo a  $E_s$  foi reduzida em aproximadamente 67 e 66% na área irrigada e de sequeiro (Tabela 9). No período intermediário ou meia estação, a redução da  $E_s$  foi ainda maior, com 0,4 e 0,3% de evaporação nas áreas irrigada e de sequeiro, respectivamente, ou seja, a evaporação foi mínima, tendo em vista que, nesse período a  $f_c$  é máxima e a energia disponível na superfície do solo para a evaporação é reduzida. Nas fases de desenvolvimento e meia estação (período intermediário) a  $T_c$  é o principal componente, assumindo quase 100% da  $ET_c$ , em ambas às áreas (Tabela 9).

No período final, ocorreu uma pequena elevação da  $E_s$ , devido a senescência das folhas das plantas, aumentando a exposição do solo novamente à radiação solar e vento, embora ainda tenham resíduos vegetais. Diferenças entre os estádios são evidentes, pois variam conforme as condições meteorológicas e irrigações, principalmente pela frequência e quantidade de água aplicada e, menos com a variabilidade interanual da fração de cobertura do solo. Valores inferiores de  $E_s$  no período final do ciclo contrastam com os resultados obtidos por Zhao et al. (2013), Wei et al. (2014), Paredes et al. (2015) e Pereira et al. (2015), que obtiveram valores de  $E_s$  maiores na fase final do ciclo, com relação ao período anterior (meia estação), sem a utilização de resíduos vegetais. Segundo Allen et al. (1998), cada fração de 10% de solo coberto por resíduos vegetais, reduz em até 5% a  $E_s$ .

A relação de evaporação do solo e  $ET_c$  ( $E_s/ET_c$ ) (Tabela 9) do presente estudo apresentou valores mais baixos, 11,91% e 10,6%, em relação aos valores obtidos por Wei et al. (2015), onde a  $E_s/ET_c$  variou de 28 a 36% e Zhao et al. (2013), onde foram obtidos valores de 23% para a cultura de inverno e 37 e 45% para cultura de verão, em 2008 e 2009, respectivamente. Isso pode ser explicado pelo rápido crescimento vegetativo e capacidade de ramificações do cultivar, que foi favorecido pela ocorrência de alto índice pluviométrico no início do ciclo de cultivo, aos 45 DAS o fechamento entre linhas era de 80% (Tabela 4), apesar

da densidade de plantas ( $311.000 \text{ plantas ha}^{-1}$ ) estar de acordo com as recomendações técnicas do cultivar.

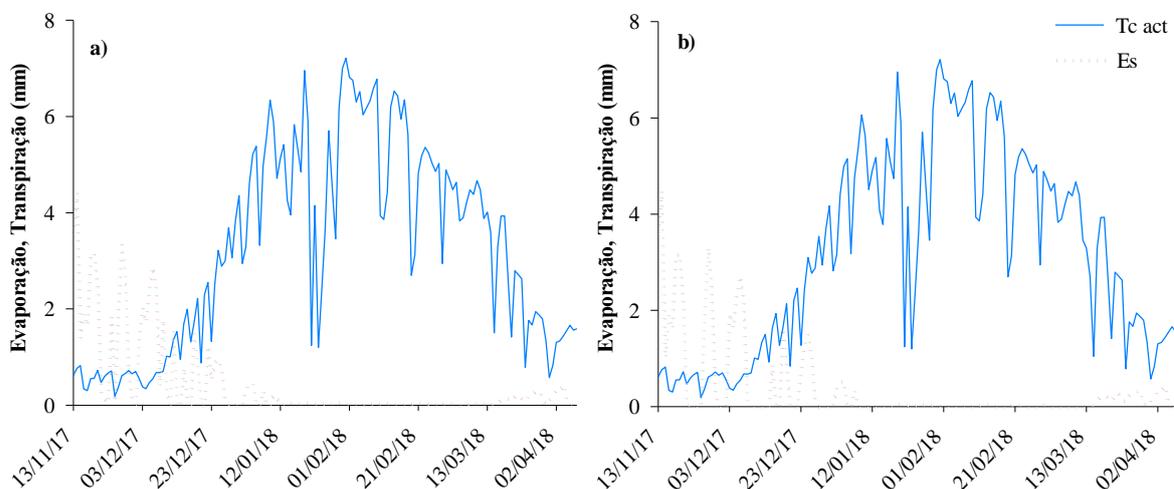


Figura 7 – Variação diária da evaporação do solo ( $E_s$ , mm) e transpiração da cultura ( $T_{c \text{ act}}$ , mm) para a área irrigada (a) e de sequeiro (b) durante o ciclo da soja – Júlio de Castilhos, RS.

#### 5.4 RENDIMENTO DA CULTURA E PRODUTIVIDADE DA ÁGUA

Os componentes de rendimento obtidos da colheita manual estão apresentados na tabela 10. O rendimento de grãos médio (colheita das parcelas) foi de  $3500$  e  $3560 \text{ kg ha}^{-1}$  para as áreas de sequeiro e irrigada, respectivamente. Os valores foram considerados suficientes para aceitar a hipótese  $H_0$  (correlação não-significativa), ou seja, o rendimento médio entre as áreas foi considerado estatisticamente igual. A chuva total, assim como o número de precipitações na área de sequeiro, foi suficiente para atender o requerimento hídrico da cultura e alcançar rendimentos comparáveis àqueles da área irrigada. A exceção foi observada no estágio fenológico de enchimento de grãos (R5.5), quando se observou um estresse leve, de acordo com as condições de simulação usadas. Os resultados do rendimento de grãos na área irrigada e de sequeiro podem ser explicados pela ausência de estresse significativo na área de sequeiro, em função do total e distribuição regular das chuvas. O fator de depleção de água utilizado, para a não ocorrência de estresse, foi de 50%, seguindo recomendação do boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998) e testado por Giménez et al. (2017) para condições subtropicais.

Tabela 10 – Componentes de rendimento da soja: altura de inserção da primeira vagem, número de vagens por planta, número de grãos por planta e peso de mil grãos (g), com as respectivas médias referentes as áreas de sequeiro e irrigada. Júlio de Castilhos, RS, 2018.

Área	Subárea	Altura inserção 1ª vagem (cm)	Nº vagens por planta	Nº grãos por planta	Peso de mil grãos (g)
Sequeiro	S1	19	49	112	152
	S2	27	65	152	152
	S3	18	51	112	146
	Média	21	55	126	150
Irigada	I1	15	58	129	147
	I2	16	48	106	149
	I3	27	46	101	151
	Média	20	51	112	149

\*S1, S2 e S3: Subáreas colhidas dentro da área de sequeiro; I1, I2 e I3: Subáreas colhidas dentro da área irrigada.

A soja tolera e se recupera de déficit hídrico leve, o que ocasionou, portanto, pequenas diferenças no rendimento. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Sentelhas et al. (2015), em Cruz Alta – RS, em que o rendimento médio real da soja foi de 2800-3050 kg ha<sup>-1</sup>, causado, principalmente, por déficit hídrico ocorrido durante a fase de enchimento de grãos. No entanto, a produção agrícola está intrinsecamente relacionada com as propriedades físicas do solo, a classe textural é determinada pela distribuição do tamanho de partículas, e o tipo de argila influencia em outras propriedades físicas como a drenagem e a retenção de água no solo. Sendo assim, o rendimento observado está dentro do potencial produtivo da área, tendo em vista que, o solo da área é caracterizado como Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico úmbrico, com aproximadamente 70% de areia e baixos teores de argila na camada superficial de 0-20 cm em ambas as áreas (Tabela 1), além disso, esta classificação caracteriza-se pela baixa fertilidade natural. Zhang et al. (2018) observou valores de produção de soja de sequeiro no Mississippi variando de 2170 a 4696 kg ha<sup>-1</sup> em três diferentes tipos de solo, enquanto que, as variações em um ano chuvoso, nas mesmas áreas, variaram apenas entre 4575 e 4643 kg ha<sup>-1</sup>.

Os resultados para a produtividade física da água (WP, WP<sub>irrig</sub> e WP<sub>BWU</sub>) e econômica (EWP, EWP<sub>irrig</sub> e EWP<sub>BWU</sub>) estão apresentados na tabela 11. A WP é comumente chamada de eficiência do uso da água (WUE), termo frequentemente utilizado em casos que envolvem sistemas de irrigação (PEREIRA et al., 2012). Os resultados para a produtividade física da água (WP e WP<sub>BWU</sub>) da área irrigada foram, respectivamente, 0,41 e 0,76 kg m<sup>-3</sup>, e da área de sequeiro, 0,48 e 0,76 kg m<sup>-3</sup>. Esses resultados são corroborados pelos de Montoya et al. (2017), que obtiveram valores de WP entre 0,46 a 0,59 kg m<sup>-3</sup> para a soja irrigada no Uruguai. Por outro

lado, valores superiores para a cultura da soja foram encontrados por Ávila et al. (2015), referente a rendimento de  $5 \text{ t ha}^{-1}$  ( $WP = 2,04 \text{ kg m}^{-3}$ ). Em relação ao uso benéfico ou consuntivo da água ( $WP_{BWU}$ ), Wei et al. (2015) relataram  $1,46 \text{ kg m}^{-3}$ , e Mbangiwa et al. (2019) para soja de sequeiro na África do Sul, a  $WP_{BWU}$  foi de  $1,14 \text{ kg m}^{-3}$ , valores superiores ao obtido no presente estudo.

Tabela 11 – Produtividade física e econômica da água (WP e EWP) para os respectivos rendimentos obtidos na área irrigada e de sequeiro, Júlio de Castilhos – RS.

Área	Produtividade média	$WP_{TOTAL}$	$WP_{irrig}$	$WP_{BWU}$	EWP	$EWP_{irrig}$	$EWP_{BWU}$
	$\text{kg ha}^{-1}$	$\text{kg m}^{-3}$	$\text{kg m}^{-3}$	$\text{kg m}^{-3}$	$\text{US}\$\text{m}^{-3}$	$\text{US}\$\text{m}^{-3}$	$\text{US}\$\text{m}^{-3}$
Irigada	3560	0,41	2,78	0,76	0,14	0,99	0,27
Sequeiro	3500	0,48	-	0,76	0,16	-	0,27

\*  $WP_{TOTAL}$  = produtividade total da água;  $WP_{irrig}$  = produtividade da água de irrigação;  $WP_{BWU}$  = produtividade da água em relação ao uso benéfico da água; EWP = produtividade econômica da água;  $EWP_{irrig}$  = produtividade econômica da água da irrigação;  $EWP_{BWU}$  = produtividade econômica da água em relação ao uso benéfico da água.

A  $WP_{irrig}$  foi  $2,78 \text{ kg m}^{-3}$ , valor evidentemente maior, pois leva em conta apenas a água utilizada pela irrigação. A eficiência do uso da água da irrigação é maior quando comparada a WUE total, a lâmina de água aplicada é apenas o suficiente para atender o requerimento hídrico da cultura, ficando disponível às plantas no perfil do solo explorado pelas raízes, sem perdas por DP e RO. Evidentemente, o manejo de irrigação adotado proporcionou uma boa  $WP_{irrig}$ , sendo que, a WUE é maior quando a irrigação é aplicada durante o período reprodutivo em comparação as aplicações antes do florescimento (STEDUTO et al., 2012). Gajić et al. (2018), para soja irrigada em região de clima temperado, encontraram  $WP_{irrig}$  de  $1,74 \text{ kg m}^{-3}$  referente à um rendimento de  $3,69 \text{ t ha}^{-1}$ .

As diferenças de WP e  $WP_{BWU}$  da área irrigada em relação à de sequeiro foram mínimas, em função dos rendimentos observados. Além disso, WP foi baixa, resultado de uma combinação de fatores, como a alta chuva recebida durante o ciclo de cultivo e das perdas por escoamento superficial e percolação profunda (Tabela 8). Esses resultados contrastam com resultados obtidos de irrigação deficitária, em que a WP é significativamente maior para tratamentos que recebem menor quantidade de água (RODRIGUES et al., 2013; CANDOGAN et al., 2013; ÁVILA et al., 2015), porém, essa não é a melhor opção do ponto de vista do produtor, que deseja obter sempre o rendimento máximo. O rendimento de grãos depende não apenas da quantidade de água de irrigação utilizada, mas também, da quantidade de água da

chuva que a cultura pode usar, que varia com a distribuição da chuva durante a safra (PEREIRA et al., 2012).

Em relação aos valores correspondentes à produtividade econômica da água quando se avaliou o uso total da água (EWP) e o uso benéfico ( $EWP_{BWU}$ ) os valores correspondentes a área irrigada foram 0,14 e 0,27 US\$ m<sup>-3</sup> e da área de sequeiro 0,16 e 0,27 US\$ m<sup>-3</sup>. Ao analisar a  $EWP_{irrig}$ , ou seja, o retorno econômico para o agricultor ao usar água de irrigação, o valor foi 0,99 US\$ m<sup>-3</sup>, BAES (2016) obteve EWP de 0,58 US\$ m<sup>-3</sup> para a soja irrigada, sem déficit hídrico, no entanto, existem poucos trabalhos em relação a produtividade econômica da água para a soja, mas a adoção desses indicadores pode levar a uma melhor compreensão do custo/benefício da irrigação como parte do manejo agrícola adotado.

## 5.5 PREDIÇÃO DO RENDIMENTO

Após a resolução da equação (13) obteve-se um fator de resposta ao rendimento ( $K_y$ ) de 0,9. Existem vários estudos relatando os valores de  $K_y$  para soja, Doorenbos & Kassam (1979) propuseram um  $K_y$  de 0,85, enquanto que Giménez et al. (2017) obtiveram um  $K_y$  de 1,25, e Zhang et al. (2018) após uma média de 14 anos de estudo, o  $K_y$  foi de 1,24, indicando que a soja era muito sensível ao estresse hídrico mesmo em uma região úmida como o Mississippi. Em contrapartida, resultados de previsão do rendimento usando um  $K_y$  igual a 1,3 (WEI et al., 2015), mostraram uma superestimativa dos rendimentos.

Através dos dados disponíveis de transpiração obtidos através do  $K_{cb}$  VI, foi realizada a validação da abordagem Stewart-SIMDualKc, aplicando-se o  $K_y$  (0,9) na equação (13), para prever o rendimento real ( $Y_a$ ) em relação a todos os rendimentos observados na área de sequeiro, conforme exposto na figura 8, assim como os respectivos desvios (Tabela 12). A análise do mapa de colheita (Figura 8) demonstra as variações espaciais de rendimento existentes na área, identificando-se cinco faixas de rendimento, variando de 500-3000, (vermelho), 3000-3800 (laranja), 3800-4500 (creme), 4500-5000 (verde claro), 5000-6000 kg ha<sup>-1</sup>(verde escuro).

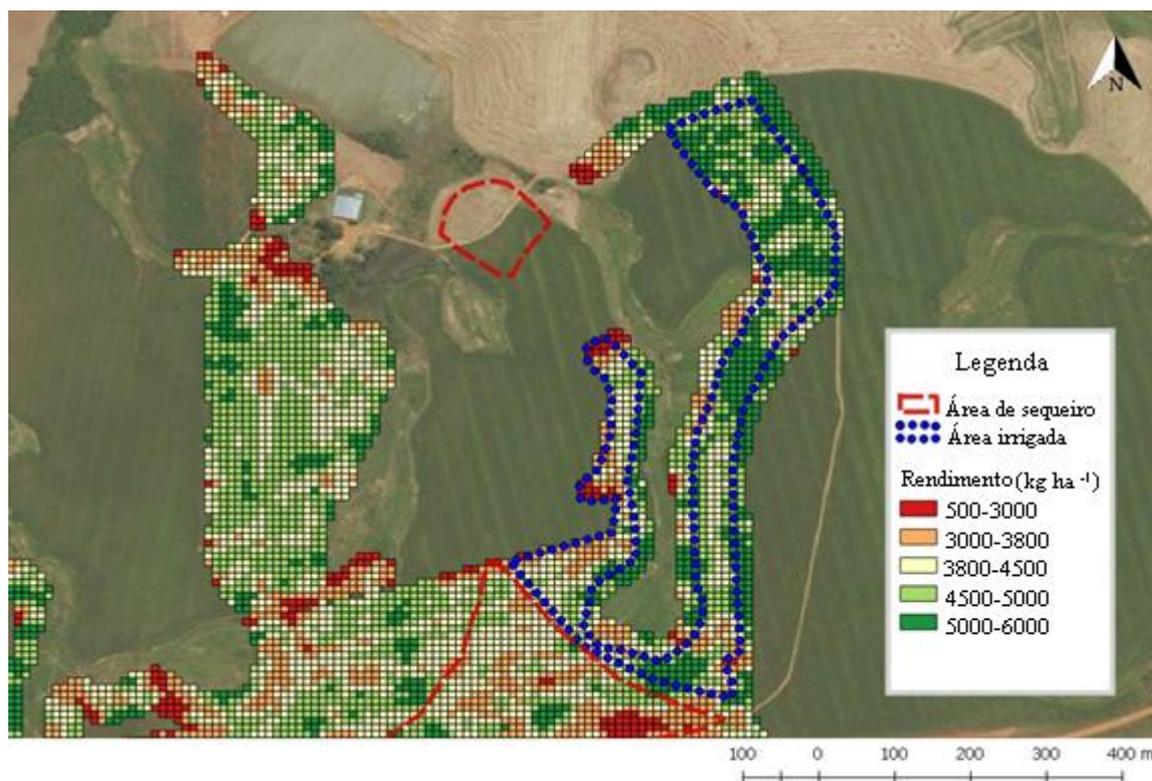


Figura 8 – Mapa de rendimento da soja, expresso em  $\text{kg ha}^{-1}$ , da lavoura do produtor rural em Júlio de Castilhos – RS. A área pontilhada em azul representa a área irrigada por pivô central e nos entornos, limitadas pelas linhas em vermelho, as áreas de sequeiro. Cores diferentes expressam os diferentes rendimentos, conforme a legenda.

Os desvios entre os rendimentos previstos e simulados variaram de 6 a 61% (Tabela 12), encontrando-se dentro da faixa dos desvios relatados por Giménez et al. (2017), os quais variaram de 1 a 61%, e dos relatados por Ma et al. (2005) utilizando os modelos de soja DSSAT-CROPGRO e o RZWQM-CROPGRO. Além disso, o autor (GIMÉNEZ et al., 2017) relata que a abordagem SIMDualKc-Stewart foi mais eficiente na predição do rendimento quando comparado ao AquaCrop, devido às estimativas insatisfatórias de  $T_c$ .

Os indicadores de qualidade em relação as previsões de rendimento foram ruins, com  $\text{RMSE} = 1245 \text{ kg ha}^{-1}$ , e  $\text{EF} = -0,48$ , de modo que, valores negativos de EF indicam que o valor observado é melhor do que o valor simulado, sendo o desempenho inaceitável e não havendo vantagem efetiva em utilizar o modelo. No entanto, os resultados do presente estudo estão de acordo com a combinação Aquacrop e Stewart em que a EF foi igual a  $-0,41$  (GIMÉNEZ et al., 2017), com as simulações de rendimento realizadas por Cera et al. (2017) utilizando o modelo SoySim, em que obteve  $\text{RMSE}$  de  $900 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $1200 \text{ kg ha}^{-1}$  para cultivares indeterminadas e semideterminadas, respectivamente, e por Paredes et al. (2014) para milho cultivado em Portugal, utilizando duas variações do modelo de Stewart, onde o  $\text{RMSE}$  variou de 1209 a  $1800 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Tabela 12 – Desvios entre o rendimento observado e previsto da soja utilizando a combinação SIMDualKc-Stewart referente a todos os dados observados.

Observado (kg ha <sup>-1</sup> )	T <sub>c act</sub> mm	SIMDualKc-Stewart		
		Predição (kg ha <sup>-1</sup> )	Desvio (kg ha <sup>-1</sup> )	(%)
3000	447	3394	-394	-12
3800	472	3573	227	6
4500	478	3613	887	25
5000	494	3726	1274	34
6000	495	3733	2267	61

O coeficiente de regressão foi igual a 0,77 e o  $R^2 = 0,87$  (Figura 9). Esses resultados indicam que os valores de rendimento previstos são estatisticamente próximos aos observados, e que uma grande fração da variação dos rendimentos observados é explicada pelo modelo. Os resultados discutidos acima não se devem à má estimativa da transpiração real na ocorrência de estresse hídrico, considerando que a melhor estimativa de predição foi em relação ao intervalo de 3000 e 3800 (Tabela 12), intervalo este que melhor se relaciona com o rendimento médio observado na área de sequeiro (3500 kg ha<sup>-1</sup>), conforme descrito em 5.4 e com a respectiva estimativa de T<sub>c</sub> (Tabela 9). Assim, o K<sub>cb v1</sub> mostrou-se eficiente quanto às estimativas de transpiração da cultura, limitando-se apenas à disponibilidade de imagens livre de nuvens no período avaliado, uma vez que, haviam todos os dados de cultura requeridos pelo modelo.

A redução no rendimento ocorreu provavelmente em função da variabilidade do solo existente na área, tendo em vista que a redução de transpiração relativa ao rendimento foi mínima, conforme observado na tabela 12. Além disso, os mapas de produtividade são o resultado da interação dos fatores de produção ligados ao solo, planta e atmosfera (BERNARDI et al., 2017). Em contrapartida, a combinação Stewart-SIMDualKc, aplicado aos intervalos de rendimento do mapa mostrou-se relevante, uma vez que, foi possível identificar as glebas de maior potencial produtivo, principalmente em períodos de maior escassez hídrica.

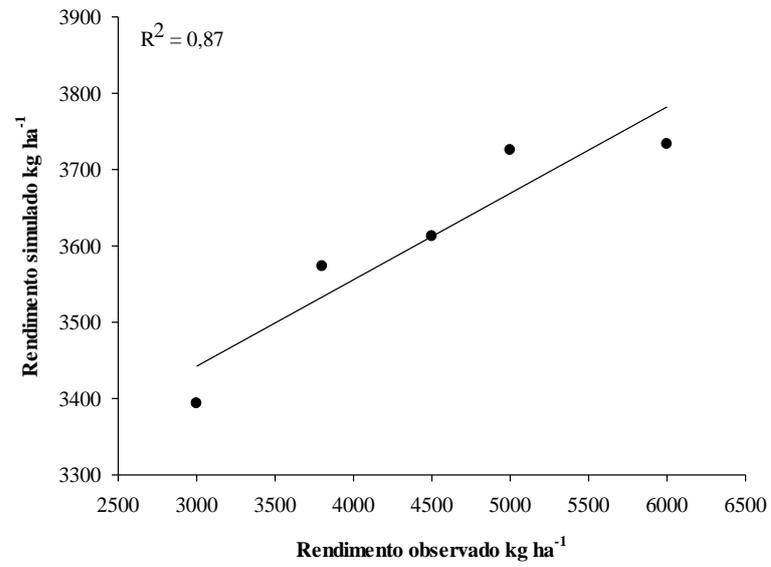


Figura 9 – Relação entre os valores de rendimento de grãos da soja observados e simulados pela abordagem SIMDualKc-Stewart.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados do presente estudo indicaram que a calibração do modelo SIMDualKc foi eficiente e capaz de simular a dinâmica da água disponível no solo, com baixas estimativas de erro (RMSE= 4,16 mm para área irrigada e 4,85 mm para a área de sequeiro). Os coeficientes de cultura basal ajustados ( $K_{cb\ ini}$ ,  $K_{cb\ mid}$  e  $K_{cb\ end}$ ) de 0,10; 1,07; 0,35, respectivamente, estão de acordo com os valores referenciados na literatura para a soja e são apropriados, portanto, para uso posterior na região central do Rio Grande do Sul.

O fator de resposta ao rendimento de Stewart ( $K_y= 0,9$ ) foi calibrado corretamente, sendo possível prever o rendimento de grãos da soja. A estimativa preditiva do rendimento com abordagem Stewart-SIMDualKc ao final da colheita permite ao produtor o planejamento da estimativa antecipada de produção de grãos.

A chuva sazonal e sua distribuição ao longo da estação de crescimento desempenharam um papel significativo nas necessidades de irrigação, produtividade da água e rendimento da soja. O elevado índice pluviométrico durante o ciclo de cultivo reduziu significativamente a WP, devido a ocorrência de escoamento superficial e percolação profunda. A diferença de rendimento de grãos entre a área irrigada e de sequeiro não apresentou diferenças significativas, mesmo após a aplicação de 128 mm via irrigação. Dessa forma, os resultados sugerem a necessidade de mais estudos, sobretudo para diferentes datas de semeadura e grupos de maturação, visando atestar melhor a necessidade de irrigação para a soja no RS.

Em geral, a metodologia adotada, tanto em relação às observações de campo realizadas na área do produtor rural, quanto à aplicação do modelo, mostrou-se adequada para entender a dinâmica da água nesse contexto e os possíveis impactos no rendimento de grãos da soja.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G. et al. **Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy.** *Agricultural Water Management*, v. 98(6), p.899–920, 2011a.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S. **Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height.** *Irrigation Science*, v.28, p.17–34, 2009.
- 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, (2005a).
- \_\_\_\_\_. **Estimating evaporation from bare soil and the crop coefficient for the initial period using common soils information.** *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.131(1), p.14–23, 2005b.
- \_\_\_\_\_. **Crop evapotranspiration.** Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: FAO, 300 p. 1998.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Atlas Irrigação: Uso da água na agricultura irrigada.** ISBN 978-85-8210-051-6. 86 p. Disponível em: < <http://www.ana.gov.br>>. Acesso em: 31 out. 2017.
- 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.
- ÁVILA, V.S. **Balço hídrico do solo e partição da evapotranspiração de soja, milho e feijão submetidos à irrigação deficitária no sul do Brasil.** 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14244:** Equipamentos de irrigação mecanizada - Pivô central e lateral móvel providos de emissores fixos ou rotativos - Determinação da uniformidade de distribuição de água. Rio de Janeiro, RJ, 11 p. 1998
- BÁEZ, M.S. A. **Partição da evapotranspiração, rendimento de grãos e retorno econômico da soja cultivada sob diferentes estratégias de irrigação.** 2017. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria.
- BERLATO, M. A. **As condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola.** *Agrometeorologia aplicada à irrigação*, p.11-24, 1992.
- BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. **Consumo de água da soja: evapotranspiração estacional em condições de ótima disponibilidade de água no solo.** In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DA SOJA, 1. Anais. Londrina: Embrapa-CNPSO, v.1, p.53-58, 1978.
- BOOTE, K.J. et al. **Agricultural Systems Modeling and Simulation.** Marcel Dekker, Inc., New York, p.651–692, 1998.

BOYER, J.S. **Plant productivity and environment**. Science, v.218, p.443–448, 1982.

BOX, G.; JENKINS, G. **Time Series Analysis: Forecasting and Control**. San Francisco: Holden-Day, 1970.

CANDOGAN, B. N. et al. **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.

CARLESSO, R. **Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas**. Revista Ciência Rural, v.25, n.1, p.183-188, 1995.

CERA, J.C. et al. **Extending the evaluation of the SoySim model to soybean cultivars with high maturation groups**. Field Crops Research, v.201, p.162–174, 2017.

CONAB. Companhia Nacional de abastecimento. 2018. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. ISSN 2318-6852. v. 7. Safra 2017/18 - Sétimo levantamento. Disponível em: < file:///C:/Users/User/Downloads/BoletimZGraosZabrilZ2018.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2017.

DE WIT, C.T. Transpiration and crop yields. Versl. Landbouwk. was consistent with the observation that the significant Onderz. v.64, p.1–88, 1958.

DIMAURO, G. et al. **Environmental and management variables explain soybean yield gap variability in Central Argentina**. European Journal of Agronomy, v.99, p.186–194, 2018.

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

DOORENBOS, J.; PRUITT W. O. **Guidelines for Predicting Crop-Water Requirements**. FAO Irrig. and Drain. Paper No. 24, 2nd rev. ed., FAO, Rome, Italy, 156p. 1977.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2013. 353 p.

\_\_\_\_\_. **Métodos de amostragem para avaliação quantitativa de pastagens**, 2006.

\_\_\_\_\_. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 1997, 212p.

FANDIÑO, M. et al. **Using the dual-Kc approach to model evapotranspiration of albarin~ o vineyards (*Vitis vinifera* L. cv. albarin~ o with consideration of active ground cover**. Agricultural Water Management, v.112, p.75-87, 2012.

\_\_\_\_\_. **What is the Optimal Water Productivity Index for Irrigated Grapevines? Case of 'Godello' and 'Albariño' cultivars**. Geophysical Research Abstracts, v.17, 2015.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, p.15, 1977.

FERERES, E.; SORIANO, M.A. **Deficit irrigation for reducing agricultural water use.** *Journal of Experimental Botany*, v.58, n.2, p.147–159, 2007.

FOROUD, N. et al. **Effect of level and timing of moisture stress on soybean yield components.** *Irrigation Science*, v.13, p.149–155, 1993.

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.

GENG, Q. et al. **Assessing China's agricultural water use efficiency in a green-blue water perspective: A study based on data envelopment analysis.** *Ecological Indicators*, v.96 p.329–335, 2019.

GIMÉNEZ, L.; PAREDES, P.; PEREIRA, L.S. **Water use and yield of soybean under various irrigation regimes and severe water stress. Application of Aqua Crop and SIMDualKc models.** *Water*, v.9 p.393, 2017.

GIMÉNEZ, L. et al. **Predicting maize transpiration, water use and productivity for developing improved supplemental irrigation schedules in western Uruguay to cope with climate variability.** *Water*, v.8, p.309, 2016.

GRASSINI, P. et al. **Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt.** *Field Crops Research*, v.179, p.150–163, 2015b.

\_\_\_\_\_. **High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt. II. Irrigation management and crop water productivity.** *Field Crops Research*, v.120, p.133–141, 2011b.

GUPTA, H. V.; S. SOROOSHIAN.; YAPO, P.O. **Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration.** *Journal of hydrologic engineering*, v.4(2), p.135-143, 1999.

HALL A. J.; RICHARDS R.A. **Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops.** *Field Crops Research*, v.143, p.18–33, 2013.

HANKS, R. J **Model for predicting plant yield as influenced by water use.** *Agronomy Journal*, v.66, p.660–4, 1974.

HEATHERLY, L.G. **Response of soybean cultivars to irrigation of a clay soil.** *Agronomy Journal*, v.75, p.859–864, 1983.

HEINEMANN, A. B. et al. **Drought impact on rainfed common bean production areas in Brazil.** *Agricultural and forest meteorology*, v.225, p. 57-74, 2016.

JHA, P.K.; KUMAR, S.N.; INES, A.V.M. **Responses of soybean to water stress and supplemental irrigation in upper Indo-Gangetic plain: Field experiment and modeling approach.** *Field Crops Research*, v.219, p.76–86, 2018.

JENSEN, M.E. **Water consumption by agricultural plants.** Water Deficit and Plant Growth. Academic Press, New York, p.1–22, 1968.

JONES, J.W. et al. **The DSSAT cropping system model.** European Journal of Agronomy, v.18, p.235–265, 2003.

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.

LIU, J. et al. **A comprehensive analysis of blue water scarcity from the production, consumption, and water transfer perspectives.** Ecological Indicators, v.72, p.870–880, 2017.

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

LOBELL, D.B.; CASSMAN, K.G.; FIELD, C.B. **Crop yield gaps: Their importance, magnitudes and causes.** Annual Review of Environment and Resources, v.34, p.179–204, 2009.

MA, L. et al. **Development and evaluation of the RZWQM-CROPGRO hybrid model for soybean production.** Agronomy Journal, v.97, p.1172–1182, 2005.

MARTIN, D.L. ET al. **Selecting sprinkler packages for center pivots.** Transactions of the ASABE, v.55, p.513–523, 2012.

MARTINS, J.D. et al. **Dual crop coefficients for maize in southern Brazil: model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil.** Biosystems Engineering, v.115, p.291–310, 2013.

MATZENAUER, R.; RADIN, B.; C, A. **Rendimento de grãos de soja e de milho, no Rio Grande do Sul, não difere entre eventos El Niño Oscilação Sul.** Revista Agrometeoros, v.26, n.1, p.123-129, 2018.

MATZENAUER, R.; RADIN, B.; MALUF, J. R. T. **O fenômeno ENOS e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul.** Revista Agrometeoros, v. 25, n. 2, p. 331-341, 2017.

MATZENAUER, R. et al. **Análise agroclimática das disponibilidades hídricas para a cultura do milho na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 8, n. 2, p. 263-273, 2000.

MICHELON, C. J. et al. **Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul.** Ciência Rural, v.40, p.848-853, 2010.

MERCAU, J.L. et al. **Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean.** Field Crops Research, v.100, p.200–209, 2007.

MEYER, W.S.; GREEN, G.C. **Plant indicators of wheat and soybean crop water stress.** Irrig. Sci., v.2, p.167-176, 1981.

MOLDEN, D. et al. **Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution.** *Agricultural Water Management*, v.97, p.528-535, 2010.

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. et al. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.** *Trans. ASABE*, 50 (3), p.885-900, 2007.

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

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

OLIVEIRA, E. C. et al. **Evapotranspiration Soybean: Comparison between eddy covariance method and the estimate of CROPGRO-Soybean model.** *Ciência e Natura*, v.38, p. 28- 33, 2016.

PAREDES, P. et al. **Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic returns of maize under various irrigation management strategies.** *Agricultural Water Management*, v.135, p.27-39, 2014.

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

\_\_\_\_\_. **Assessing yield, water productivity and farm economic returns of malt barley as influenced by the sowing dates and supplemental irrigation.** *Agricultural Water Management*, v.79, p.132-143, 2017.

\_\_\_\_\_. **Assessing potato transpiration, yield and water productivity under various water regimes and planting dates using the FAO dual K<sub>c</sub> approach.** *Agricultural Water Management*, v.195, p.11-24, 2018.

\_\_\_\_\_. **Evapotranspiration partition and crop coefficients of Tifton 85 bermudagrass as affected by the frequency of cuttings. Application of the dual K<sub>c</sub> approach.** *Water*, v.10, p.558, 2018.

PAYERO, J. O.; IRMAK, S. **Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean.** *Agricultural Water Management*, v.129, p.31-43, 2013.

PEREIRA, L.S.; PAREDES, P. **Modelling water use on farms.** *Water management for sustainable agriculture*, 2018.

PEREIRA, L. S. **Water, agriculture and food: Challenges and issues.** *Water Res. Manage.*, v.31(10), p.2985-99, 2017.

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.

\_\_\_\_\_. **Coping with Water Scarcity: Addressing the Challenges.** Springer, p.382, 2009.

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

PEREIRA, L. S. et al. **Crop-Water Models.** Special issue of the ICID Bulletin, ICID, New Delhi, 200p. 1992.

\_\_\_\_\_. **Crop-Water Simulation Models in Practice.** Wageningen Pers, Wageningen, the Netherlands, 1995.

PÔÇAS, I. et al. **Estimation of actual crop coefficients using remotely sensed vegetation indices and soil water balance modelled data.** *Remote Sensing*, v.7, n.3, p.2373–2400, 2015.

QIU, R. et al. **Assessing the SIMDualKc model for estimating evapotranspiration of hot pepper grown in a solar greenhouse in Northwest China.** *Agricultural Systems*, v.138, p.1–9, 2015.

RAES, D. et al. **FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water.** Rome, p. 1-19, 2018.

RIBEIRO, A., et al. **Pivotpoint América Latina.** Valley Ano 04, N° 09, 76p. 2018.

RITCHIE, J.T. **Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover.** *Water Resources*, v.8, p.1204–1213, 1972.

RODRIGUES, G.C. et al. **Modelling economic impacts of deficit irrigated maize in Brazil with consideration of different rainfall regimes.** *Biosystems Engineering*, v.116, p.97–110, 2013b.

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

\_\_\_\_\_. **Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 2. Model testing.** *Agricultural Water Management*, v.103, p.62-77, 2012.

SANTOS, R. F.; CARLESSO R. **Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.2, n.3, p. 287-294, 1998.

SENTELHAS, P.C et al. **The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for a sustainable production.** Journal of Agricultural Science, v.157, p.1394–1411, 2015.

SETIYONO, T.D. et al. **Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions.** Field Crops Research, v.119, p.161–174, 2010.

SINCLAIR, T.R. **Water and nitrogen limitation in soybean grain production I. Model development.** Field Crops Research, v.15, p.125–141, 1986.

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

SILVEIRA, J. M. C. et al. **Identificação de áreas irrigadas por pivô central na sub-bacia tambaú-verde utilizando imagens ccd/cbers.** Irriga, v.18, n.4, p.721-729, 2013.

SPECHT, J. E. et al. **Soybean response to water: a QTL analysis of drought tolerance.** Crop Science, v.41, p.493– 509, 2001.

STEWART, J.I. et al. **Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil.** Paper 67. Utah Water Research Laboratory, Logan, 191 p. 1977.

STEDUTO, P. et al. **In: FAO Irrigation and Drainage Paper Nr. 66.** FAO, Rome, Italy, 2012.

TABRIZI, M.S.; PARSINEJAD, M.; BABAZADEH, H. **Efficacy of partial root drying technique for optimizing soybean crop production in semi-arid regions.** Irrigation and Drainage. v.61, p.80–88, 2012.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal.** 6 ed. 2017.

TANNER C.B.; SINCLAIR T.R. **Efficient water use in crop production: research or re-research?** Limitations to efficient water use in crop production. Madison, American Society of Agronomy, p.1–27, 1983.

THOMAS, A.L.; COSTA, J.A. **Influência do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.29, n.9, p.1389-1396, 1994.

TORRES, M.D.O.; HOWITT, R.; RODRIGUES, L.N. **Modeling the economic benefits and distributional impacts of supplemental irrigation.** Water Resources and Economics, v.14, p.1–12, 2016.

USDA. **World Agricultural Production.** U.S. Department of Agriculture. Circular Series WAP 7-18. July, 2018.

VAUX, J. H. J.; PRUITT, W. O. **Crop water production functions.** Advances in Irrigation, v.2, p.61-97, 1983.

ZHANG, B. et al. **Soybean crop-water production functions in a humid region across years and soils determined with APEX model.** Agricultural Water Management, v.204, p.180–191, 2018.

ZHANG, B. et al. **The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat summer maize crop sequence in North China Plain.** *Irrigation Science*, v.31, p.1303–1316, 2013.

ZHAO, N. N. et al. **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*, v.117, p.93-105, 2013.

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