

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Centro de Desenvolvimento Tecnológico**  
**Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos**



**Tese**

**Otimização da irrigação das culturas da soja e do milho no sistema sulco-camalhão em terras baixas**

**Letícia Burkert Mélllo-Araujo**

Pelotas, 2023

**Letícia Burkert Mélo-Araujo**

**Otimização da irrigação das culturas da soja e do milho no sistema  
sulco-camalhão em terras baixas**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Recursos Hídricos.

Orientador: Lessandro Coll Faria

Coorientador: José Maria Barbat Parfitt

Pelotas, 2023

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

A663o Araujo, Letícia Burkert Mélo

Otimização da irrigação das culturas da soja e do milho no sistema sulco-camalhão em terras baixas / Letícia Burkert Mélo Araujo ; Lessandro Coll Faria, orientador ; José Maria Barbat Parfitt, coorientador. — Pelotas, 2023.

114 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2023.

1. Consumo relativo da água. 2. Evapotranspiração. 3. Sensoriamento remoto. 4. Escoamento superficial. 5. Precipitação efetiva. I. Faria, Lessandro Coll, orient. II. Parfitt, José Maria Barbat, coorient. III. Título.

CDD : 627

Letícia Burkert Mélo-Araujo

Otimização da irrigação das culturas da soja e do milho no sistema sulco-camalhão  
em terras baixas

Tese aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 02 de março de 2023.

Banca examinadora:

.....  
Prof. Dr. Lessandro Coll Faria (Orientador)  
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras.

.....  
Pesquisador Dr. José Maria Barbat Parfitt (Coorientador)  
Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas.

.....  
Pesquisador Dr. Adilson Luís Bamberg  
Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas.

.....  
Prof. Dr. Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki  
Doutor em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria.

.....  
Prof. Dr. Vitor Emanuel Quevedo Tavares  
Doutor em Ciência e Tecnologia de Sementes pela Universidade Federal de Pelotas.

Aos meus pais, Paulo Ricardo e Nádía Betânia

A minha filha Luiza Mello

Ao meu esposo Fábio Araujo

Dedico!

## **Agradecimentos**

À Deus, Deusa ou qualquer forma de força superior, por ter me oportunizado fé, saúde física e principalmente emocional para superar as dificuldades, propiciando-me fazer o melhor e conhecer os melhores.

Ao meu marido e companheiro Fábio Araujo, pelo valioso e incansável apoio em todos os momentos deste trabalho, desde acumular responsabilidades domésticas até ao fundamental suporte despendido no período do experimento, que coincidiu com minha recuperação pós operatória.

A minha filha amada Luiza Mello, pelo amor, carinho e compreensão da privação do tempo de convívio para realização deste trabalho e também ajuda no experimento.

Aos meus pais Paulo Ricardo e Nádia Betânia, pela educação que me concederam e apoio, sobretudo nos momentos mais difíceis.

À minha irmã Natália e afilhada Alice, pelo amor, carinho e torcida.

Ao meu orientador Lessandro Coll Faria pela confiança, orientação e cooperação na realização do trabalho.

Ao Coorientador José Maria Barbat Parfitt pela orientação, ensinamentos, cooperação na realização do trabalho e incentivo ao empreendedorismo.

À Marília Alves pela amizade, orientações extraoficiais e apoio emocional.

À Universidade Federal de Pelotas e seus funcionários pela estrutura.

Ao PPG em Recursos Hídricos por todo apoio e a todos os seus professores pelo conhecimento que souberam compartilhar.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

Aos colegas e amigos da turma 2019 do PPG, em especial ao Lukas Boeira, à Jéssica Ogassawara, à Paula Josyane, à Bruna Sell, à Tamiris Castro, à Nelva Riquetti e ao Angelo Garcia com os quais dividi, dúvidas, muitas horas de estudo, alegrias, conversas e uma inestimável convivência.

À Alexssandra Campos (Índia), por todo apoio durante o experimento.

Aos produtores rurais que disponibilizaram os dados para este estudo.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para concluir mais essa etapa.

Obrigada!

## Resumo

MÉLLO-ARAUJO, Letícia Burkert. **Otimização da irrigação das culturas da soja e do milho no sistema sulco-camalhão em terras baixas**. Orientador: Lessandro Coll Faria. Coorientador: José Maria Barbat Parfitt. 2023. 114 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós Graduação em recursos Hídricos. Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

As características físico-hídricas dos solos de terras baixas propiciam historicamente a predominância do cultivo do arroz irrigado por inundação. No entanto, a inserção de cultivos de sequeiro, como soja e milho em sucessão e/ou em rotação com o arroz, traz melhorias ao sistema de produção, além de contribuir para a competitividade produtiva nas terras baixas. Uma vez que a irrigação de culturas de sequeiro nesse ambiente é recente, torna-se necessário conhecer a demanda hídrica para o manejo racional de irrigação dessas culturas. O objetivo deste estudo foi otimizar a irrigação das culturas da soja e do milho cultivados no sistema sulco-camalhão a partir da calibração e ajuste de parâmetros de um modelo de balanço hídrico do solo (BH). Para isso, o trabalho constituiu-se das seguintes etapas: (a) calibração de um modelo de BH, utilizando coeficiente das culturas ( $K_c$ ) oriundos da literatura regional, nas safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22 de diferentes locais de produção no Rio Grande do Sul; (b) estimativa do consumo relativo de água; (c) avaliação da produtividade da água; (d) estimativa do coeficiente da cultura  $K_{c(NDVI)}$  para soja e milho através da relação entre o índice de vegetação (IV) *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), e o  $K_{c(FAO-56)}$ ; (e) estimativa da  $ET_{c(NDVI)}$  a partir do  $K_{c(NDVI)}$ ; (f) Propor uma relação entre a produtividade de grãos das culturas e os IVs: NDVI, SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e SR (*Simple Ratio*); (g) ajustar os parâmetros CN e taxa de abstração inicial ( $\lambda$ ) do método Curva Número do Soil Conservation Service (SCS-CN), através de dados observados de escoamento superficial a fim de estimar o escoamento superficial e a infiltração em solos de terras baixas. Os resultados indicam que o modelo de BH calibrado com parâmetros disponíveis na literatura se mostrou eficiente, com incremento médio de  $29 \text{ sc ha}^{-1}$  nas áreas de soja irrigada. Ocorreu deficiência hídrica com classificado de alto risco, durante os períodos críticos da soja e do milho não irrigados nas diferentes regiões de terras baixas do Rio Grande do Sul. A produtividade da água na produção de soja e milho é variável, em função da distribuição local das precipitações, principalmente no período reprodutivo da cultura, além das características do solo, cultivar e manejos agrônômicos adotados. No entanto, mostrou-se mais eficiente para o milho. Os valores de  $K_c$  estimados a partir do processamento de dados de sensoriamento remoto fornecem informações mais precisas para determinar a demanda hídrica das culturas de soja e milho, promovendo a melhor eficiência do uso da água no sistema sulco-camalhão. Os IVs NDVI e SR foram os mais adequados para estimar a produtividade das culturas da soja e do milho. O modelo modificado SCS-CN<sub>m</sub> ajustando  $CN_m = 56,16$  e  $\lambda_m = 0,1$  apresentou melhor ajuste, com eficiência  $E = 0,83$ . Assim para utilização do BH na otimização da irrigação faz-se necessário utilizar as estimativas adequadas da evapotranspiração das culturas bem como do escoamento superficial e infiltração da água nos solos de terras baixas.

**Palavras-chave:** Consumo relativo da água; evapotranspiração; sensoriamento remoto; escoamento superficial; precipitação efetiva.

## Abstract

MÉLLO-ARAUJO, Leticia Burkert. **Optimization of irrigation of soybean and maize crops in the furrow-ridge system in lowlands**. Advisor: Lessandro Coll Faria. Co-advisor: José Maria Barbat Parfitt. 2023. 114 f. Thesis (Doctorate in Water Resources) – Water Resources Post-Graduate. Technological Development Center, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2023.

The physical-hydric characteristics of lowland soils have historically led to the predominance of flood-irrigated rice cultivation. However, the insertion of rainfed crops, such as soy and maize in succession and/or in rotation with rice, brings improvements to the production system, in addition to contributing to productive competitiveness in the lowlands. Since the irrigation of rainfed crops in this environment is recent, it is necessary to know the water demand for the rational irrigation management of these crops. The objective of this study was to optimize the irrigation of soybean and maize crops cultivated in the furrow-ridge system based on the calibration and adjustment of parameters of a soil water balance (BH) model. For this, the work consisted of the following steps: (a) calibration of a BH model, using the crop coefficient ( $K_c$ ) from the regional literature, in the 2019/20, 2020/21 and 2021/22 harvests from different locations production in Rio Grande do Sul; (b) estimate of relative water consumption; (c) assessment of water productivity; (d) estimate of the crop coefficient  $K_c$  (NDVI) for soybean and maize through the relationship between the vegetation index (IV) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and  $K_c$  (FAO-56); (e) estimation of  $ET_{c(NDVI)}$  from  $K_c$  (NDVI); (f) Propose a relationship between crop grain yield and VIs: NDVI, SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index) and SR (Simple Ratio); (g) adjust the CN parameters and initial abstraction rate ( $\lambda$ ) of the Curve Number method of the Soil Conservation Service (SCS-CN), through observed runoff data in order to estimate runoff and infiltration in land soils casualties. The results indicate that the BH model calibrated with parameters available in the literature was efficient, with an average increment of 29 sc ha<sup>-1</sup> in the irrigated soybean areas. Water deficiency classified as high risk occurred during the critical periods of non-irrigated soybean and maize in the different lowland regions of Rio Grande do Sul. Water productivity in soybean and maize production is variable, depending on the local distribution of precipitation, especially during the crop's reproductive period, in addition to the characteristics of the soil, cultivar and agronomic management adopted. However, it proved to be more efficient for maize. The  $K_c$  values estimated from the processing of remote sensing data provide more accurate information to determine the water demand of soybean and maize crops, promoting better water use efficiency in the furrow-ridge system. The NDVI and SR IVs were the most adequate to estimate the productivity of soybean and maize crops. The modified model SCS-CN<sub>m</sub>, adjusting CN<sub>m</sub> = 56.16 and  $\lambda_m$  = 0.1, showed the best fit, with efficiency E = 0.83. Thus, in order to use BH in optimizing irrigation, it is necessary to use adequate estimates of crop evapotranspiration as well as surface runoff and water infiltration in lowland soils.

**Keywords:** Relative water consumption; evapotranspiration; remote sensing; surface runoff; effective precipitation

## Lista de Figuras

Figura 1	Localização dos solos de várzea no Rio Grande do Sul. ....	24
Figura 2	Caracterização dimensional do sistema de irrigação sulco-camalhão. ....	27
Figura 3	Representação esquemática dos fluxos do balanço hídrico. ....	29
Figura 4	Valores de Kc para soja e milho nas diferentes fases do ciclo. ....	32
Figura 5	Localização das áreas agrícolas do estudo .....	39
Figura 6	Localização da área experimental. ....	52
Figura 7	(a) Distribuição espacial da área de estudo: pluviômetro, pontos de instalação dos dataloggers, hidrômetros e as linhas de fluxos hídricos (micro drenagem, macrodrenagem e sulcos) e (b) ponto de instalação dos hidrômetros. ....	53
Figura 8	Balanço hídrico do solo com o déficit e excedente durante a safra 2019/20 (a) soja- área 1; (b) soja - área 2 e (c) soja – área 3. ....	58
Figura 9	Balanço hídrico do solo com déficit e excedente durante a safra 2020/21 (a) soja - área 1; b) Soja - área 2 e (c) Soja - área 4. ....	61
Figura 10	Balanço hídrico do solo com o déficit e excedente durante a safra 2020/21, (a) soja- área 5; (b) soja - área 6 e (c) milho – área 7. ....	62
Figura 11	Balanço hídrico do solo com déficit e excedente durante a safra 2021/22 (a) soja - área 1; b) Soja - área 4 e (c) Milho - área 7. ....	65
Figura 12	Balanço hídrico do solo com déficit e excedente durante a safra 2021/22 (a) milho - área 8 e (b) milho - área 9. ....	66
Figura 13	Comportamento espectral de NDVI ( <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> ), EVI ( <i>Enhanced Vegetation Index</i> ), SAVI ( <i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i> ) e SR ( <i>Simple Ratio</i> ) para a cultura da soja no período 2019/20 – área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c); 2020/21 - área 1 (d), área 2 (e), área 4 (f), área 5 (g) e área 6 (h) e 2021/22 área 1 (i) e área 4 (j). ....	73
Figura 14	Comportamento espectral de NDVI ( <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> ), EVI ( <i>Enhanced Vegetation Index</i> ), SAVI ( <i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i> ) e SR ( <i>Simple Ratio</i> ) para a cultura do milho no período 2021/22 – área 7 (a), área 8 (b) e área 9 (c). ....	74
Figura 15	Regressão linear entre os valores de Kc (FAO-56) e NDVI ( <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> ) para a cultura da soja cultivada em sistema sulco-camalhão, durante o ano-safra 2019/20 - área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c); 2020/21 – área 1 (d), área 2 (e), área 4 (f), área 5 (g) e área 6 (h) e 2021/22 área 1 (i) e área 4 (j). ....	76

Figura 16	Regressão linear entre os valores de $K_c$ (FAO-56) e NDVI ( <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> ) para a cultura do milho cultivado em sistema sulco-camalhão, na safra 2021/22 - área 7 (a), área 8 (b) e área 9 (c). ...	77
Figura 17	Regressão linear entre os valores de $K_c$ (FAO-56) e NDVI ( <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> ) em terras baixas: (a) para a cultura da soja e (b) para a cultura do milho.....	78
Figura 18	Curvas $K_c$ (FAO-56) e $K_c$ (NDVI) ajustadas e seus gráficos de dispersão (a) soja e (b) milho. ....	79
Figura 19	Variação da água disponível no solo com base no $ET_c$ (FAO-56) e simulado utilizando $ET_c$ (NDVI) nas áreas de estudo, safra 2019/20 - área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c); 2020/21 – área 1 (d), área 2 (e), área 4 (f), área 5 (g)....	81
Figura 20	Variação da água disponível no solo com base no $ET_c$ (FAO-56) e simulado utilizando $ET_c$ (NDVI) nas áreas de estudo, safra 2020/21 - área 6 (a) e área 7 (b); 2021/22 – área 1 (c), área 4 (d), área 7 (e), área 8 (f) e área 9 (g). ...	82
Figura 21	Regressão linear entre os valores de produtividade obtida de grãos de soja cultivada em sistema sulco-camalhão safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22 e IVs: (a) NDVI ( <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> ); (b) SAVI ( <i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i> ); (c) EVI ( <i>Enhanced Vegetation Index</i> ) e (d) SR ( <i>Simple Ratio</i> ).....	84
Figura 22	Regressão linear entre os valores de produtividade obtida de grãos de milho cultivado em sistema sulco-camalhão safra 2021/22 e IVs: (a) NDVI ( <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> ); (b) SAVI ( <i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i> ); (c) EVI ( <i>Enhanced Vegetation Index</i> ) e SR ( <i>Simple Ratio</i> ).....	84
Figura 23	Volume de escoamento superficial medido (a) versus escoamento estimado pelo método SCS-CN padrão e (b) versus escoamento estimado pelo método SCS-CN <sub>m</sub> .....	87
Figura 24	Variação dos valores de $\Delta ARM$ simulados através dos modelos SCS-CN e SCS-CN <sub>m</sub> em: (a) Camalhão - 10 cm; (b) Camalhão – 25 cm; (c) Sulco – 10 cm.....	90

## Lista de Tabelas

Tabela 1	Dados das áreas em estudo das safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22: tamanho das áreas, município, cultivares, datas de semeadura e datas de colheita. ....	40
Tabela 2	Condiçõais utilizadas no modelo do balanço hídrico do solo para determinação do armazenamento diário de água no solo.....	41
Tabela 3	Parâmetros físicos dos solos das áreas em estudo: frações granulométricas, umidade volumétrica na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível no solo (CAD).....	42
Tabela 4	Condições de umidade antecedente do solo, consideradas pelo SCS para escolha do CN.....	44
Tabela 5	Tipos de solos considerados no método SCS-CN para a determinação do parâmetro CN.....	44
Tabela 6	Valores de CN em função da cobertura do solo e do tipo hidrológico de solo, para a condição de umidade II em bacias rurais.....	45
Tabela 7	Risco de perda de rendimento de grãos de soja e milho de acordo com o índice $E_{Tr}/E_{Tc}$ .....	48
Tabela 8	Índices de vegetação utilizados para estimativa do $K_c$ (NDVI) e produtividade das culturas .....	49
Tabela 9	Data das imagens do sensor OLI (Landsat-8) utilizadas para calcular os índices de vegetação para servir como variáveis preditoras nos modelos da presente pesquisa .....	50
Tabela 10	Propriedade hidráulicas do solo .....	52
Tabela 11	Coeficiente de cultura do azevém .....	55
Tabela 12	Componentes do balanço hídrico referente às áreas de soja, irrigada e de sequeiro simulado, cultivadas em sulco-camalhão na safra 2019/20.....	57
Tabela 13	Componentes do balanço hídrico referentes a campos de soja e milho de sequeiro irrigados e simulados cultivados em sulco-sulco nas áreas de estudo na safra 2020/21.....	59
Tabela 14	Componentes do balanço hídrico referentes a lavouras de soja e milho de sequeiro irrigado e simulado cultivadas em sulco-sulco nas áreas de estudo na safra 2021/22.....	63

Tabela 15	Produtividade média da soja irrigada e milho irrigados e produtividade média da soja nas áreas de referência cultivados em sulco-camalhão, durante as safras 2019/2020, 2020/21 e 2021/22 .....	68
Tabela 16	Classificação do índice produtividade da água $WP_{Total}$ ( $kg\ m^{-3}$ ) para as culturas de soja e milho cultivados em sulco camalhão em terras baixas.....	70
Tabela 17	Valores simulados das demandas hídricas e irrigações utilizando $K_c$ (FAO-56) e $K_c$ (NDVI) para as culturas de soja e milho cultivados em sulco-camalhão nas safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22. ....	80
Tabela 18	Estatística de desempenho para os modelos SCS-CN padrão e modificado para previsão de escoamento de precipitação. ....	88
Tabela 19	Armazenamento de água no solo ( $\Delta ARM$ ) medido versus simulações do ( $\Delta ARM$ ) com base na infiltração calculada através dos modelos SCS-CN antes e depois da modificação dos parâmetros. ....	89

## Lista de abreviaturas e siglas

AMC	Condição Antecedente de Umidade
BH	Balanço hídrico
CAD	Capacidade de água disponível no solo
CC	Capacidade de campo
CN	Curva Número
CRAS	Curva de retenção de água no solo
ET <sub>c</sub>	Evapotranspiração da cultura
ET <sub>o</sub>	Evapotranspiração de referência
ET <sub>r</sub>	Evapotranspiração real
ET <sub>r</sub> /ET <sub>c</sub>	Índice de consumo relativo de água
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
I	Irrigação
I <sub>a</sub>	Abstração inicial
IV	Índice de vegetação
K <sub>c</sub>	Coefficiente da cultura
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
P	Precipitação
P <sub>ef</sub>	Precipitação efetiva
P <sub>es</sub>	Precipitação escoada
PMP	Ponto de murcha permanente
SAVI	<i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SR	<i>Simple Ratio</i>
TI	Terço inferior
TM	Terço médio
TS	Terço superior
WP <sub>Irrig</sub>	Índice de produtividade da água da irrigação
WP <sub>Total</sub>	Índice de produtividade da água total
ΔARM	Variação do armazenamento de água no solo
λ	Taxa de captação inicial

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>Revisão de Literatura</b> .....	<b>21</b>
2.1	As culturas da soja e do milho .....	21
2.2	Solos de terras baixas do Rio Grande do Sul .....	23
2.3	Tecnologias para cultivos de sequeiro em terras baixas .....	25
2.3.1	Sulco-camalhão .....	26
2.4	Balanço hídrico do solo (BH) .....	28
2.4.1	Capacidade de água disponível no solo (CAD) .....	29
2.4.2	Método (SCS-CN) para estimar a infiltração de água no solo .....	30
2.4.3	Demanda hídrica da cultura ( $ET_c$ ) .....	31
2.4.4	Consumo relativo de água ( $ET_r/ET_c$ ) .....	34
2.4.5	Produtividade da água (WP) .....	35
2.4.6	Índices de vegetação (IV) .....	35
2.4.6.1	Plataforma Google Earth Engine – GEE .....	37
<b>3</b>	<b>Materiais e métodos</b> .....	<b>39</b>
3.1	Balanço hídrico do solo (BH) .....	39
3.1.1	Localização e descrição das áreas em estudo .....	39
3.1.2	Variação do armazenamento de água no solo ( $\Delta ARM$ ) .....	40
3.1.3	Estimativa da precipitação efetiva ( $P_{ef}$ ) .....	42
3.1.4	Estimativa da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) .....	46
3.1.5	Estimativa da evapotranspiração real ( $ET_r$ ) .....	46
3.1.6	Estimativa da produtividade da água .....	48
3.2	Ajustes dos parâmetros ( $ET_c$ e $P_{ef}$ ) .....	48
3.2.1	Estimativa da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) a partir do NDVI .....	48
3.2.1.1	Séries temporais dos índices de vegetação .....	48
3.2.1.2	Evapotranspiração da cultura – $ET_c$ (NDVI) .....	50
3.2.1.3	Estimativa de produtividade ( $WP_{Total}$ e $WP_{Irrig}$ ) .....	51
3.2.2	Estimativa da precipitação efetiva ( $P_{ef}$ ) a partir de dados observados .....	51
3.2.2.1	Descrição do local de estudo .....	51
3.2.2.2	Caracterização físico-hídrica do solo .....	52
3.2.2.3	Experimento de campo e coleta de dados .....	52

3.2.2.4	Método SCS-CN padrão.....	54
3.2.2.5	Obtenção dos parâmetros modificados CN ( $CN_m$ ) e $\lambda$ ( $\lambda_m$ ) .....	54
3.2.2.6	Balanço hídrico do solo após a obtenção dos parâmetros ( $CN_m$ ) e $\lambda$ ( $\lambda_m$ ).....	55
3.2.3	Análise dos dados .....	55
<b>4</b>	<b>Resultados e discussão.....</b>	<b>57</b>
4.1	Balanço hídrico do ano-safra 2019/20.....	57
4.2	Balanço hídrico do ano-safra 2020/21 .....	59
4.3	Balanço hídrico do ano-safra 2021/22.....	63
4.4	Resumo dos balanços hídricos para os três anos de safra .....	66
4.5	Produtividade da água (WP) .....	68
4.6	Ajuste de parâmetros .....	72
4.6.1	Sensoriamento remoto para ajuste da $ET_c$ .....	72
4.6.1.1	IVs da soja e milho nas safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22 .....	72
4.6.1.2	Estimativa do $K_c$ e $ET_c$ a partir do NDVI .....	76
4.6.1.3	Estimativa da produtividade da soja e milho utilizando IVs .....	84
4.6.2	Estimativa da infiltração da água em solos de terras baixas no sistema sulco-camalhão através de dados medidos e simulados .....	86
4.6.2.1	Método SCS-CN padrão e SCS- $CN_m$ modificado .....	86
4.6.2.2	Relações entre a umidade do solo e métodos SCS-CN e SCS- $CN_m$ .....	88
<b>5</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>92</b>
<b>6</b>	<b>Sugestões para estudos futuros.....</b>	<b>93</b>
	<b>Referências.....</b>	<b>94</b>
	<b>Apêndices .....</b>	<b>111</b>

## 1 Introdução

No Rio Grande do Sul (RS), cerca de 20% da área total é ocupada por terras baixas, essas áreas estão localizadas principalmente na metade sul do RS e ocorrem em grandes extensões na região das planícies costeiras, principalmente próximo às lagoas (PINTO; MIGUEL; PAULETTO, 2017). Os solos das áreas de terras baixas possuem caráter hidromórfico, apresentam pouca profundidade efetiva, baixa porosidade, alta densidade, elevada relação micro/macroporos e baixa velocidade de infiltração, por conta da camada superficial rasa seguida de uma camada subsuperficial quase impermeável, resultando em perfis de solo baixa capacidade de armazenamento de água (GOMES *et al.*, 2006). Essas características favorecem a cultura predominante na região, o arroz (*Oryza sativa L.*) irrigado por inundação, porém, essas mesmas características são desfavoráveis para culturas de sequeiro, visto que, a baixa velocidade de infiltra o e pequena capacidade de armazenamento de água nesses solos o torna suscetível ao excesso e ao deficit hídrico.

O excesso hídrico ocorre em períodos chuvosos, onde a drenagem natural é limitada, provocando um ambiente anaeróbico, o que para cultivos de sequeiro prejudica a aera o das raízes e a absor o de nutrientes, afetando o crescimento radicular e da parte aérea, o que conseqüentemente reflete no rendimento de gr os. Na soja, as fases mais suscetíveis são: germina o, crescimento vegetativo e início da fase reprodutiva (SH FFEL *et al.*, 2001; GITHIRI *et al.*, 2006). No milho, o estresse anaeróbico reduz significativamente a sobrevivência e o crescimento de plântulas, com tolerância que varia de poucas horas a até três dias, dependendo do genótipo (SUBBAIAH & SACHS, 2003).

Por outro lado, os frequentes períodos sem precipita o promovem o déficit hídrico, que é acentuado para cultivos anuais de sequeiro com ciclos primavera-verão, onde a maior demanda de água pela planta coincide com a maior demanda evaporativa da atmosfera. O déficit hídrico reflete na redu o do rendimento de gr os, a soja (*Glycine max L.*) apresenta maior sensibilidade ao déficit no período reprodutivo, principalmente entre R3-R5 (KARAM *et al.*, 2005). Para o milho (*Zea mays L.*), o período crítico começa no início do pendoamento até aproximadamente

30 dias após, o que compreende a fase da floração e o início do enchimento de grãos (MATZENAUER, 2002).

No entanto, a relevância econômica das culturas da soja e do milho vêm estimulando alguns produtores a buscar alternativas para superar as restrições naturais dos solos de terras baixas e tratar o cultivo dessas culturas como outra atividade de renda, o que traz benefícios econômicos, além de tornar os sistemas mais produtivos e sustentáveis (PARFITT *et al.*, 2019).

Uma alternativa que vêm sendo difundida nos últimos anos é a tecnologia sulco-camalhão. Nesse sistema a superfície do solo é configurada para que a área elevada (camalhão) seja a área cultivável, com solo mais profundo e descompactado, e o sulco formado entre os camalhões seja a área de drenagem do excesso hídrico, condução da irrigação por superfície e ainda como zona de tráfego para as máquinas. Ou seja, é uma solução tanto para o excesso quanto para o déficit hídrico, apontando as terras baixas como uma nova fronteira agrícola com estabilidade produtiva das culturas de sequeiro.

Contudo, a irrigação de culturas de sequeiro cultivadas em sulco-camalhão no ambiente terras baixas é recente, surgindo para os produtores majoritariamente orizícolas, dúvidas sobre o manejo da irrigação e a nova demanda sobre os recursos hídricos. O balanço hídrico do solo (BH) é uma fundamental para o manejo racional da irrigação (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997).

A incerteza nos parâmetros implementados no BH afeta a precisão do mesmo, assim é fundamental proceder a parametrização para diferentes condições para a minimização de erros. De acordo com o modelo matemático simplificado a variação do armazenamento de água no solo ( $\Delta ARM$ ) é definida como: ( $\Delta ARM = P + I - ET_c$ ), as entradas são: P (precipitação) e I (irrigação) e as saídas são:  $ET_c$  (evapotranspiração da cultura), P e  $ET_c$ . Essas são as principais componentes a serem calibradas de acordo com as características edafoclimáticas locais, uma vez que a irrigação é dependente do sistema adotado e previamente dimensionado.

Sobre a precipitação, é fundamental a compreensão do comportamento da infiltração de água no solo. Segundo Bouma (1991), esse comportamento é controlado por fatores como: textura e estrutura do solo, teor de água inicial, taxa de aplicação, dentre outros. Modelos hidrológicos visando a quantificação direta do escoamento, e indireta da infiltração, foram desenvolvidos e vêm sendo aprimorados para os mais

diversos interesses das ciências do solo e da água (HAGHIABI *et al.*, 2011; ZOLFAGHARI *et al.*, 2012).

Entre os modelos, o método da curva número (CN), desenvolvido pelo *United States Department of Agriculture–Soil Conservation Service* (USDA-SCS, 1972) é amplamente utilizado devido a sua fácil aplicabilidade, tendo por principal vantagem o uso de um único parâmetro, o CN (curva número), que representa o solo, o uso da terra, a umidade do solo antecedente e as condições hidrológicas de um campo ou de uma bacia hidrográfica (BHUYAN; MANKIN; KOELIKER, 2003). Além disso, o método considera a precipitação total, dispensando dados de intensidade ou duração (VIJI; RAJESH PRASANNA; ILANGO VAN, 2015).

Por outro lado, o cálculo da  $ET_c$  implica na obtenção de coeficientes de cultura ( $K_c$ ) que geralmente se dá através do método proposto pela *Food and Agriculture Organization* (FAO), boletim FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998).

No entanto, ambos métodos padrões (SCS-CN e  $K_c$  FAO-56) têm sido questionados na literatura científica. A aplicabilidade e limitações de uso do método SCS-CN são relatados em estudos de (DILE *et al.*, 2016, MICHEL; VAZKEN; CHARLES, 2005, MISHRA; SINGH, 2004; STEENHUIS *et al.*, 1995). Sobre a importância da calibração local para a obtenção do  $K_c$  e estimativa da  $ET_c$  estudos que combinaram o modelo FAO-56 e sensoriamento remoto, em diversas regiões e culturas demonstraram que o  $K_c$  derivado das relações  $K_c$ -NDVI concorda com o  $K_c$  recomendado pela FAO em vários estágios de crescimento da cultura, porém o método proposto pela FAO-56 superestimou a  $ET_c$  (ER-RAKI *et al.*, 2007; DRERUP; BRUECK, SCHERER, 2017; MAHMOUD; GAN, 2019).

Dessa forma, percebe-se que os métodos padrões (SCS-CN e  $K_c$  FAO-56), cujos parâmetros foram atribuídos com base nas condições hidrológicas e pedológicas distintas das condições do Sul do Brasil, podem aumentar a probabilidade de sub ou superestimar  $P$  e  $ET_c$  e por consequência refletir em um manejo impreciso da irrigação, pondo em risco a produtividade das culturas e a eficiência do sistema de produção como um todo, o que torna necessário calibrar os parâmetros de acordo com as características locais dos solos de terras baixas.

Diante do exposto, nota-se que a parametrização de um modelo de balanço hídrico visando o manejo da irrigação requer confiabilidade e ajustes locais para maior eficiência, no entanto no que tange irrigação de culturas de sequeiro para sistema

sulco-camalhão em solos de terras baixas, não é encontrado na literatura parâmetros indicados exclusivamente para tais condições.

Ainda que não tenha oficialmente publicado a relação do número de produtores ou de áreas adotantes da tecnologia sulco-camalhão para implantação de culturas de sequeiro em terras baixas, estima-se a partir de informação fornecida por G. Cassol representante da PipeBR, em painel proferido na 33<sup>a</sup> Abertura Oficial da Colheita do Arroz e Grãos em terras baixas, que a tecnologia sulco-camalhão no Rio Grande do Sul tenha abrangido uma área de 22.000 ha na safra 2020/21 aumentando para 60.000 ha na safra 2022/23, com perspectivas de aumento nos próximos anos.

Portanto, infere-se que toda informação gerada nesse estudo visa auxiliar essa demanda crescente de produtores irrigantes contribuindo para o uso racional dos recursos hídricos e diversificação do sistema produtivo nas regiões com solos de terras baixas.

### **Objetivo Geral**

Otimizar a irrigação das culturas da soja e do milho cultivados no sistema sulco-camalhão a partir da calibração e ajuste de parâmetros de um modelo de balanço hídrico do solo (BH).

### **Objetivos Específicos**

- (a) Calibrar um modelo de BH, utilizando coeficiente das culturas ( $K_c$ ) oriundos da literatura regional para o cálculo da evapotranspiração das culturas ( $ET_c$ ), da soja e do milho em diferentes locais de produção no Rio Grande do Sul;
- (b) Estimar o consumo relativo de água através do índice  $ET_r/ET_c$  (evapotranspiração real sobre evapotranspiração da cultura);
- (c) Avaliar a produtividade da água, através dos indicadores de produtividade da água: *Water Productivity* total ( $WP_{total}$ ) e da irrigação ( $WP_{Irrig}$ );
- (d) Estimar o coeficiente da cultura  $K_{c\ NDVI}$  para soja e milho através do ajuste de regressão linear entre o índice de vegetação (IV) *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), obtido a partir do processamento de dados do satélite (Landsat-8) e o  $K_c$  (FAO-56) (disponível na literatura internacional);
- (e) Estimar a nova demanda hídrica da soja e do milho  $ET_c$  (NDVI) quando utilizado o  $K_{c\ NDVI}$  e comparar à demanda hídrica calculada a partir do  $K_c$  (FAO-56);

- (f) Propor uma relação entre a produtividade de grãos das culturas e os IVs: NDVI, SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e SR (*Simple Ratio*) para futuras estimativas de produtividades;
- (g) Ajustar os parâmetros CN e taxa de abstração inicial ( $\lambda$ ) do método Curva Número do *Soil Conservation Service* (SCS-CN), através de dados observados de escoamento superficial a fim de estimar o escoamento superficial e a infiltração em solos de terras baixas.

### **Hipóteses**

- I. Para garantir a produtividade das culturas da soja e do milho em terras baixas é necessário irrigar e a utilização do balanço hídrico do solo possibilita o manejo da irrigação eficiente.
- II. O uso de  $K_c$  estimado pelo índice espectral de vegetação NDVI, viabiliza o cálculo da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) com maior precisão da necessidade hídrica da soja em relação ao método estabelecido pela FAO-56.
- III. O método Curva Número (CN) do *Soil Conservation Service* com parâmetros padrões subestima os volumes de escoamento superficial em terras baixas.

## 2 Revisão de Literatura

### 2.1 As culturas da soja e do milho

A soja é uma leguminosa de cultivo anual, com indícios de origem na China. Sendo cultivada há séculos, é uma das principais *commodities* agrícolas devido sua alta valorização e demanda (HYMOWITZ, 2008). Em 2018, a produção global de soja foi de 349 milhões de toneladas, desses 35% foram produzidos pelos EUA e 34% pelo Brasil. Segundo levantamento baseado em dados de 2017 a 2019, 76% da soja produzida no mundo é destinada para alimentação animal: (37% aves, 20,2% suínos, 5,6% aquacultura, 13,3% outros); 20% para alimentação humana direta: (2,6% tofu, 2,1% leite de soja, 13,2% óleo de soja e 2,2% outros) e 4% para a indústria: (2,8% biodiesel, 0,3% lubrificantes, 0,7% outros) (RITCHIE; ROSER, 2021).

Na região Sul do Brasil a soja foi utilizada com maior intensidade a partir da década de 60 do século XX, tendo sua intensificação em terras baixas na metade sul do RS em torno da safra 2009/10. Desde então, apresenta um crescente aumento nas áreas tradicionalmente cultivadas com arroz, chegando a aproximadamente 300 mil hectares no ano de 2018, cerca de 30% da área de arroz (IRGA, 2019). Isto se deu primeiramente pela necessidade de controlar a infestação do arroz vermelho, e depois pelos bons preços da soja, que encorajaram alguns produtores a tratar o cultivo da soja em terras baixas como outra atividade de renda.

Porém, a soja diferente do arroz, não dispõe de aerênquimas<sup>1</sup> em seu sistema radicular, assim, não tolera períodos prolongados de alagamento do solo, demonstrando a importância do estabelecimento de um eficiente sistema de drenagem para o sucesso da inserção de cultivos de sequeiro em terras baixas (FARACO *et al.*, 2018).

Por outro lado, em épocas de estiagens a indisponibilidade hídrica pode reduzir em até 100% o rendimento médio da cultura da soja, dependendo da magnitude da escassez trazendo prejuízos a produtividade agrícola (AKPINAR; LUCAS; BUDAK,

---

<sup>1</sup> Espaços vazios que conectam raízes, colmos e folhas, esse sistema de conexão permite o eficiente suprimento de oxigênio ao sistema radicular, mesmo no sistema de produção inundado (YOSHIDA, 1981).

2013). Assim, é fundamental encontrar alternativas sustentáveis que melhorem ou conservem a estrutura física do solo, proporcionando o suprimento de oxigênio, nutrientes e água e ainda favorecer o crescimento e desenvolvimento radicular (BLAINSKI *et al.*, 2008).

Diante disso, alguns trabalhos visando o aumento de produtividade de soja têm sido realizados em áreas de terras baixas nos últimos anos. Pilon *et al.* (2016), avaliaram a resposta de diferentes genótipos de soja provenientes do programa de melhoramento de soja da Embrapa, os quais apresentaram os melhores rendimentos quando comparados às cultivares comerciais.

Em relação à interação entre genótipo e fixação biológica de nitrogênio em ambiente de terras baixas, Mattos *et al.* (2019), avaliaram a eficiência de novas estirpes de *Bradyrhizobium* visando o incremento da produtividade de duas linhagens de soja e encontraram novas estirpes que permitem que determinadas linhagens de soja expressem elevadas produtividades de grãos em terras baixas.

O milho é uma gramínea, com origem nas Américas, com vestígios históricos entre a América do Norte e Central (SILVEIRA *et al.*, 2015). É considerada uma das plantas mais versáteis e eficientes, utilizada tanto para alimentação humana e animal, seja como silagem ou grão, tanto na produção de leite e carne quanto para a produção de biocombustíveis.

Devido a sua adaptabilidade à diferentes condições edafoclimáticas é cultivada em todas regiões do país, sendo utilizada tanto para subsistência em pequenas propriedades, aplicando-se baixa tecnologia, quanto em propriedades onde se aplica alto nível tecnológico, principalmente para abastecer as indústrias (MARUCCI *et al.*, 2010).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, produzindo cerca de 8% de um total mundial estimado em 1,16 bilhão de toneladas para a safra 2020/21, ficando somente atrás dos Estados Unidos, que produz cerca de 30% e da China que produz 22% (USDA, 2020).

Contudo, o Rio Grande do Sul apresenta déficit de grãos de milho, que vêm aumentando nos últimos anos em razão da crescente demanda da indústria de proteína animal. A partir do balanço realizado entre as séries históricas anuais de produção de milho no estado (CONAB, 2022) e da soma das estimativas do consumo das atividades de suinocultura e avicultura no estado (IBGE, 2022), estima-se que em

2022, as importações de milho no estado chegarão a 3,7 milhões de toneladas, 66% maior do que em 2021, de 2,2 milhões de toneladas.

Segundo Emater (2021), na safra de verão 2020/21, o Rio Grande do Sul produziu um total de 4,3 milhões de toneladas de milho grão em uma área de 796 mil hectares, o que corresponde a uma produtividade média de 5.403 kg ha<sup>-1</sup>, tendo as maiores produtividades (8.000 a 13.000 kg ha<sup>-1</sup>), distribuídas nas regiões norte e noroeste do estado. Atribui-se as menores produtividades da metade sul do RS (5.000 a 8.000 kg ha<sup>-1</sup>), não só às características dos solos de terras baixas, mas também, aos manejos da cultura, do solo e da água adotados (CONCENÇO; DEL AGUILA; VERNETTI Jr., 2017; GASTAL *et al.*, 2004).

O milho é bastante exigente em relação à disponibilidade hídrica, sendo necessária a utilização da irrigação complementar em épocas de estiagens, principalmente no período reprodutivo (R1 – R4), por outro lado, tem-se a susceptibilidade do milho ao excesso hídrico, principalmente entre a germinação e o estágio de três folhas (R3), quando em desenvolvimento inicial, em especial quando a planta ainda encontra-se imediatamente abaixo da superfície do solo (PARFITT *et al.*, 2017).

Visando a melhoria da produtividade de grãos de milho em terras baixas, Maass (2016), avaliou o desempenho agrônomo e econômico de quatro cultivares de milho híbrido em Gleissolo em função do método de irrigação, obtendo alta responsividade de todas as cultivares em estudo à irrigação, quando cultivado em áreas de arroz irrigado, com incremento de até cinco vezes no rendimento de grãos.

## **2.2 Solos de terras baixas do Rio Grande do Sul**

As terras baixas ou como usualmente são chamados, solos de várzea, abrangem uma área de aproximadamente 4,4 milhões de hectares, do estado do Rio Grande do Sul, correspondendo a aproximadamente 20% da área total, encontrando-se majoritariamente na metade sul do RS, em baixas altitudes (até 200 m) e em relevo variando de plano a suave ondulado (PINTO; MIGUEL; PAULETTO, 2017).

Segundo Streck *et al.* (2008), esses solos desenvolvidos a partir de sedimentos, apresentam grande heterogeneidade em sua composição granulométrica e mineralógica, distribuídos nas quatro províncias geomorfológicas existentes no Rio Grande do Sul: Planalto, Depressão Periférica, Escudo Sul-Riograndense e Planície

Costeira. São encontrados em grandes extensões na região das planícies costeiras, principalmente próximo às lagoas (Figura 1).

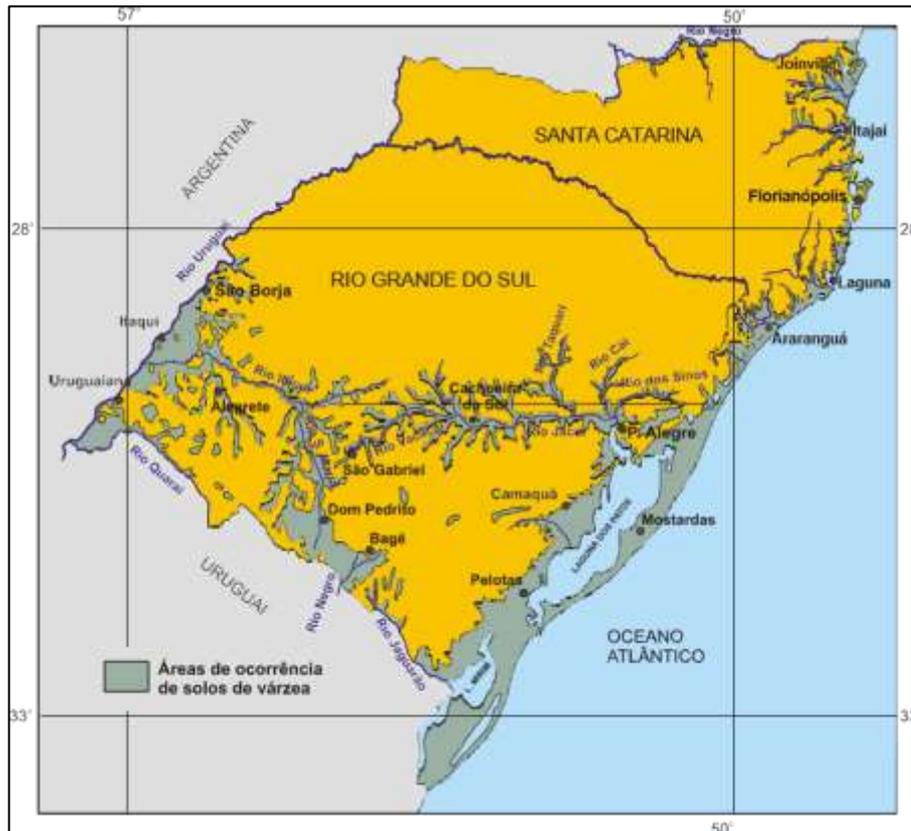


Figura 1 - Localização dos solos de várzea no Rio Grande do Sul.  
Fonte: PINTO; LAUS NETO; PAULETTO, 2004.

As principais classes em que estão incluídos os solos de terras baixas, de acordo com o Sistema brasileiro de classificação de solos, são: Planossolos, Gleissolos, Chernossolos, Vertissolos, Neossolos (Flúvicos e Quartzarênicos Hidromórficos) e Organossolos (SANTOS *et al.*, 2013).

Associa-se aos solos de terras baixas, um perfil com camada superficial pouco profunda e subsuperficial mais impermeável, conferindo ainda algumas características físicas recorrentes como: baixa porosidade, alta densidade, elevada relação micro/macroporos e baixa velocidade de infiltração, possuindo em geral, drenagem natural deficiente (hidromorfismo) (PARFITT *et al.*, 2017).

Essas características favorecem há mais de um século, as principais atividades agropecuárias desenvolvidas nesse ecossistema, a monocultura de arroz irrigado por inundação e pecuária extensiva de corte. A lavoura de arroz no estado do Rio Grande do Sul tem uma grande importância socioeconômica, principalmente na metade Sul do estado, onde segundo estimativas do IRGA (2019), aproximadamente 8,7 milhões

de toneladas de arroz, são produzidas sob irrigação de superfície, o que corresponde aproximadamente a 67% de todo arroz produzido no Brasil.

Devido a isso, a monocultura foi cultivada sucessivamente ao longo dos anos o que acabou ocasionando maior incidência de doenças como a brusone (*Pyricularia oryzae*) e ainda a infestação de plantas daninhas, sendo o arroz vermelho a principal delas (SOSBAI, 2014). Competindo por luminosidade e nutrientes e ainda pertencendo a mesma espécie da cultura principal, o arroz vermelho teve seu controle dificultado, devido a inviabilidade do uso de herbicidas seletivos, causando redução no rendimento de grãos e conseqüentemente na produtividade da cultura principal, ou seja, grandes prejuízos (KALSING *et al.*, 2013; FARACO *et al.*, 2018).

Como alternativa, a introdução de culturas de sequeiro em rotação com o arroz traz vantagens ambientais, econômicas e sociais ao sistema produtivo. Ambientais, através da quebra dos ciclos, auxiliando no controle de doenças e no uso de herbicidas para controle das plantas daninhas e ainda por possibilitar a ciclagem de nutrientes através dos diferentes enraizamentos (PACHECO *et al.*, 2009), econômicas, pelo fato de possibilitar ao produtor a implantação de uma cultura de verão no lugar do pousio (WANDER *et al.*, 2010) e sociais, por propiciar aumento de renda aos trabalhadores do campo, já que, acrescentar uma safra anual com cultura de verão em troca ao pousio, estimula a contratação de mão-de-obra (SOSBAI, 2014).

Por tudo isso, o sucesso de cultivos de sequeiro em solos de terras baixas é dependente de um adequado manejo do solo, da cultura e da irrigação, tornando-se um desafio o conhecimento e entendimento de todas as reações físicas e químicas neles existentes para a adoção das melhores práticas produtivas e conservacionistas.

### **2.3 Tecnologias para cultivos de sequeiro em terras baixas**

Devido aos problemas mencionados anteriormente como, infestação de plantas invasoras, aumento na incidência de doenças e ainda a subutilização das áreas em pousio, o método convencional de cultivo de arroz irrigado vem sendo revisto e alvo de muitas pesquisas. Essas pesquisas buscam trazer soluções tecnológicas voltadas a minimização de estresses para os cultivos de sequeiro em terras baixas e assim incentivar a rotação de cultura, objetivando elevar as produtividades e sustentabilidade dos mesmos.

Dentre as soluções tecnológicas desenvolvidas para cultivos de sequeiro em terras baixas podem ser citadas a implantação de protocolos de boas práticas

agrícolas como o manejo integrado de insetos-praga em soja (FERNANDES *et al.*, 2020), manejo da fertilidade do solo para a cultura da soja (SCIVITTARO *et al.*, 2017), fixação biológica de nitrogênio na soja em terras baixas: coinoculação (MATTOS *et al.*, 2015) e sistemas eficientes de manejo do solo e da água (PARFITT *et al.*, 2021).

Entre as tecnologias voltadas ao manejo do solo e da água citam-se o camalhão de base larga e o sulco-camalhão. A utilização de camalhões de base larga viabiliza o cultivo de espécies vegetais que não toleram o encharcamento, e também permite a adoção plena do sistema plantio direto e da Integração Lavoura e Pecuária (ILP) (THEISEN *et al.*, 2017).

É válido apontar que o sistema camalhão de base larga está voltado a resolver a deficiente drenagem natural dos solos de terras baixas, porém quando as necessidades hídricas dos cultivos de sequeiro não são supridas regularmente ao longo dos ciclos através das chuvas, deve-se implantar algum sistema de irrigação suplementar, como o de aspersão mecanizado, por exemplo.

### **2.3.1 Sulco-camalhão**

O sistema sulco-camalhão representa uma das alternativas para amenizar os principais limitantes ao bom desempenho de cultivos de sequeiro em terras baixas. Nesse sistema a área é sistematizada em desnível, eliminando-se as depressões existentes na área, oferecendo uma excelente drenagem superficial em tempo de chuvas intensas, através dos camalhões, e ainda permitindo a irrigação por sulco em época de estiagem.

Embora existam diversas configurações do sistema sulco-camalhão implantadas atualmente, Parfitt, *et al.* (2021), visando maior eficiência tanto em drenagem quanto em irrigação, indicam a seguinte configuração: camalhões construídos com 90 cm de espaçamento de centro a centro e com uma altura de aproximadamente 20 cm, com declividade variada ao longo do seu comprimento entre 0,05 e 0,1%. Esse formato permite a implantação de duas linhas de cultivos em cada camalhão, tanto de soja como de milho, além de adequar a distância entre sulcos às bitolas mais comuns dos tratores e implementos, uma vez que os rodados devem transitar pelo sulco (Figura 2).



Figura 2 – Caracterização dimensional do sistema de irrigação sulco-camalhão.

O sistema sulco-camalhão tem sido testado em lavouras comerciais em vários locais do RS. Gollo *et al.* (2021), avaliaram o desempenho e a eficiência das técnicas de irrigação por sulco-camalhão e as relacionou com o potencial de rendimento da soja em áreas de terras baixas do Sul do Brasil na safra 2017/18 e concluíram que a utilização do sulco-camalhão aumenta a produtividade da soja, minimiza o risco de perdas durante anos com ocorrência de déficit hídrico, podendo aumentar o retorno econômico da produção em até 28% em comparação com a soja de sequeiro nas terras baixas.

Atribui-se a maior receptividade ao sistema sulco-camalhão nos últimos anos à duas fundamentais tecnologias: a geotecnologia que permite fazer a sistematização com declividade variada (suavização) e a disponibilidade de politubos no mercado. A suavização tornou possível adequar a superfície do solo das lavouras com menos movimento de solo, isto é, realizar a operação com maior rapidez, economia e menor agressão ao solo (BUENO *et al.*, 2020). E os politubos, permitem uma irrigação eficiente, prática e com baixo custo, quando associados a um adequado projeto de manejo da água (CASSOL *et al.*, 2020).

Por outro lado, ainda que comprovada sua eficiência para cultivos de sequeiro em terras baixas, há uma resistência em relação a rotação com o arroz, visto que ao utilizar o usual sistema de arroz irrigado, os camalhões são desfeitos antes da semeadura do arroz na safra posterior, o que representa um alto custo adicional ao orizicultor. Em busca de soluções, Concenço *et al.* (2020), analisaram a produtividade

do cultivo de arroz com a realização da semeadura sobre o sulco-camalhão, diretamente na estrutura residual da soja da safra anterior, o que resultou em uma redução de 5 a 15% no estabelecimento das plantas da cultura, no entanto, não afetando significativamente a produtividade de grãos.

Diante dos fatos descritos, há a expectativa de que o sistema sulco-camalhão seja amplamente difundido nas próximas safras, tanto para os produtores de terras baixas que queiram inserir cultivos de sequeiro como principal cultura, quanto para aqueles que queiram utiliza-lo para a rotação com o arroz. Para isso, diversos cultivos de sequeiro de importância econômica vêm sendo testados em terras baixas em diferentes sistemas de manejo, sendo as principais alternativas a soja (VEDELAGO, 2014) e o milho (BONOW, THEISEN, XAVIER, 2013).

#### **2.4 Balanço hídrico do solo (BH)**

O manejo da irrigação consiste na determinação do momento, da quantidade e de como aplicar a água em um cultivo de interesse. Basicamente, existem três formas de se realizar o manejo da irrigação, sendo elas: via solo, onde se monitora as condições de umidade do solo, via clima, que é baseado nas condições atmosféricas e via planta, o qual baseia-se nas observações das condições de água na planta (MAROUELLI *et al.*, 2011).

O balanço hídrico do solo (BH) para o manejo da irrigação é uma adaptação do balanço hídrico climatológico sequencial, o qual resulta das interações do sistema solo-planta-atmosfera, porém visando a aplicação em um menor volume de controle (área cultivada). Dessa maneira, contabilizando as entradas e saídas de água desse sistema, pode-se estimar a necessidade de água da cultura implantada e enfim, determinar quanto e quando irrigar (REICHARDT & TIMM, 2012).

A fim de simplificação para a irrigação, alguns elementos do BH são considerados nulos, uma vez que se trata de um sistema aberto. Considera-se que o mesmo escoamento superficial que está entrando é o mesmo que sai, da mesma forma é considerado para as drenagens laterais, drenagem profunda e a ascensão capilar. Assim, as principais entradas de água no sistema são, a precipitação (P) e irrigação (I) e das formas de saídas, têm-se as perdas de água que ocorrem para a atmosfera na forma de vapor, seja em resposta à evaporação da superfície do solo ou da água interceptada pelo copado e ainda pela transpiração das folhas (ET) (PEREIRA; ALLEN, 1997) (Figura 3).

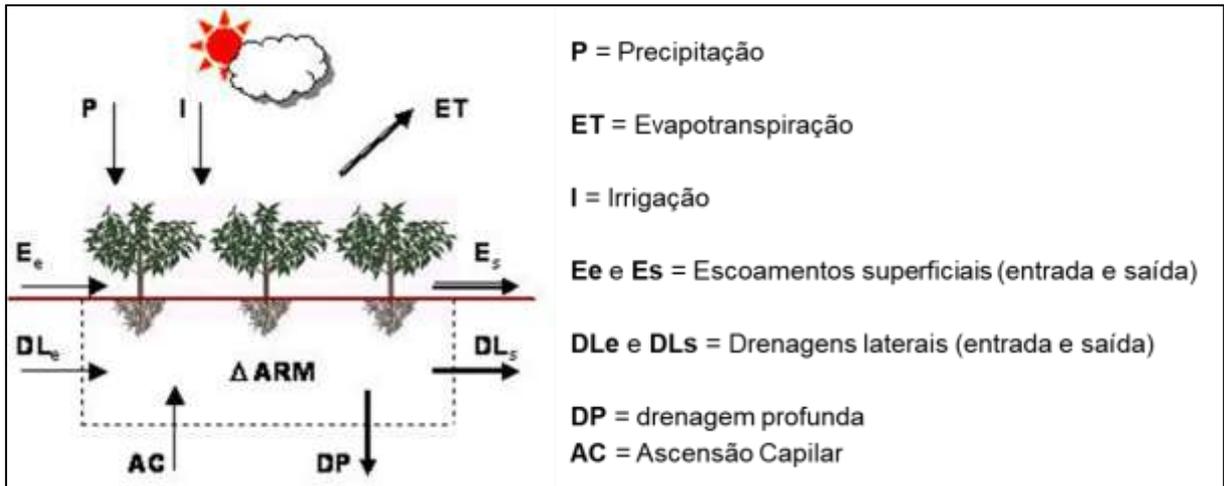


Figura 3 - Representação esquemática dos fluxos do balanço hídrico.

Fonte: Adaptado de PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002.

Assim, para um eficiente BH, deve-se conhecer os seguintes aspectos fundamentais (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002):

- Características físicas do solo: são características essenciais para determinar a capacidade de água disponível do solo (CAD), fundamental para estimar as variações do armazenamento de água no solo ( $\Delta ARM$ ). Além do comportamento de resposta à infiltração desse solo ao receber as entradas (I e P);
- Fenologia da cultura: a necessidade hídrica de uma cultura varia de acordo com o tipo de cultura e suas fases fenológicas, essa determinação foi simplificada através de coeficiente de cultura ( $K_c$ );
- Demanda hídrica da cultura: a  $ET_c$ , por sua vez, é dependente das condições meteorológicas, das características e o estágio fenológico da cultura.

#### 2.4.1 Capacidade de água disponível no solo (CAD)

Uma importante ferramenta que caracteriza as propriedades hidráulicas do solo e possibilita a obtenção da capacidade de água disponível do solo (CAD) é a curva de retenção de água no solo (CRAS) (TORMENA & SILVA, 2002). A CRAS expressa a relação direta entre a quantidade de água em unidade de massa ou em volume de solo e seus potenciais mátricos (ALLEN *et al.*, 1998). Na prática, a obtenção da CAD se dá através da diferença entre dois pontos da CRAS, sendo eles a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP).

Sobre a importância da determinação da CAD e demais características físicas do solo, aponta-se a relação das entradas do BH (P e I) e a infiltração, considerando que parte do que precipita infiltra, sendo então contabilizada no fornecimento de água

para as plantas. Entre essas características, a ser considerada na dinâmica da infiltração e armazenamento de água em solos de terras baixas cita-se a profundidade do horizonte B em relação à superfície do solo. Segundo Tomazelli; Dillenburg; Villwock (2000), os processos de formação dos Planossolos e Gleissolos, tipos de solos predominantes nessas áreas, conferem uma alta variabilidade espacial da profundidade do topo do horizonte B, ou seja, observa-se solos rasos a profundos em uma mesma área. Parfitt; Pinto; Timm (2014), analisaram a profundidade do topo do horizonte B em uma área de 0,81 ha, pertencente à Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado e observaram valores variando de 20 a 113 cm de profundidade.

#### **2.4.2 Método (SCS-CN) para estimar a infiltração de água no solo**

O conceito de precipitação efetiva varia de acordo com a área de interesse. Enquanto para fins de dimensionamentos de obras hidráulicas a precipitação efetiva pode ser considerada toda aquela fração de volume que escoar superficialmente, gerando uma vazão a ser estimada, para o manejo da irrigação, considera-se que parte da precipitação infiltrada no solo ficará disponível às plantas e, quando esta excede a CAD, perde-se por escoamento e/ou percolação profunda.

A infiltração é controlada por diversos fatores: textura e estrutura do solo, teor de água inicial, taxa de aplicação etc. (BOUMA, 1991). Modelos empíricos, semiempíricos e de base física, visando a quantificação do escoamento e da infiltração, foram desenvolvidos e vêm sendo aprimorados para os mais diversos interesses das ciências do solo e da água (HAGHIABI *et al.*, 2012; ZOLFAGHARI; MIRZAEI; GORJI, 2012).

Uma vez que a obtenção direta de dados de precipitação efetiva demanda tempo e custo, modelos matemáticos empíricos são comumente utilizados para a estimativa, a partir da precipitação bruta total. Dentre os modelos existentes na literatura, está o método CN-SCS, desenvolvido pelo *United States Department of Agriculture – Soil Conservation Service* (USDA-SCS, 1972), também encontrado nas bibliografias recentes como *Natural Resource Conservation Service Curve Number* (USDA – NRCS, 2004; SAHU; MISHRA; ELDHO, 2010; AJMAL *et al.*, 2015).

O CN-SCS, amplamente utilizado devido sua simplicidade, foi desenvolvido para a estimativa do escoamento superficial direto ( $P_{es}$ ), estimando-se o

armazenamento potencial de água no solo (S) a partir de um único parâmetro, o CN (*Curve-Number*), este por sua vez, reflete as condições da cobertura vegetal, dos atributos físico-hídricos do solo e as condições de umidade antecedente, com base na precipitação dos últimos 5 dias (MACHADO, 2002).

No entanto, o método tem sido questionado na literatura hidrológica, Silveira; Charbonnier; Genta (2000), constataram que o modelo pode produzir erros visto que seus parâmetros constantes foram atribuídos com base nas condições hidrológicas e pedológicas distintas de nosso país. Outro foco de dúvida em relação ao método é o valor padrão de 20% à taxa de abstração inicial ( $\lambda = 0,2$ ), trabalhos desenvolvidos em diversas localidades reportaram melhores ajustes quando obtiveram valores de  $\lambda$  variando de 0,0 a 0,3 (CAZIER & HAWKINS, 1984; HUANG *et al.*, 2006; FU *et al.*, 2011).

Além disso, Hawkins *et al.* (2009), apontam que as duas hipóteses fundamentais do modelo são geradoras de incertezas, segundo os autores essas hipóteses possuem uma base física frágil. Refletindo sobre o mesmo problema Geetha *et al.* (2008), propuseram que o valor de  $\lambda$  não seja fixo em 0,2, diferente do proposto no método original, visto sua dependência nas condições climáticas e geológicas regionais. Jiang (2001), também ressalta que diferentes valores de  $\lambda$  influenciam a previsão do escoamento superficial, pois estes provocam diferentes resultados.

Desta forma, aponta-se a importância do desenvolvimento de pesquisas que sejam capazes de estimar os parâmetros CN e  $\lambda$ , mediante cenários distintos de uso e ocupação do solo.

### **2.4.3 Demanda hídrica da cultura ( $ET_c$ )**

A demanda hídrica da cultura, também denominada de evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) é obtida de forma simplificada conforme modelo apresentado pela FAO (ALLEN *et al.*, 1998), através da multiplicação do valor da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) pelo coeficiente da cultura ( $K_c$ ), sendo o  $K_c$  dependente do tipo de cultura e do estágio fenológico.

O  $K_c$  resulta da razão entre  $ET_c$  e a  $ET_o$ , representando a integração entre os efeitos de quatro características que diferenciam a superfície de referência da cultura, sendo estas, a altura de plantas, o albedo (reflectância), a resistência do dossel, e a evaporação do solo (ALLEN *et al.*, 1998). Existem algumas metodologias visando a

obtenção no  $K_c$  para o cálculo da  $ET_c$ , entre elas, destaca-se o  $K_c$  simples ou basal e o  $K_c$  dual.

O  $K_c$  simples de diversas culturas pode ser obtido através de valores tabelados listados no Boletim 56 da FAO. Segundo dados adaptados de Doorenbos & Pruitt (1977); Allen *et al.* (1998), a evolução com o tempo dos valores de  $K_c$  para culturas anuais, pode ser dividido em quatro fases, em que as fases 1, 2, 3 e 4 correspondem a 17%, 28%, 33% e 22%, respectivamente, do ciclo total, conforme apresentado na Figura 4.

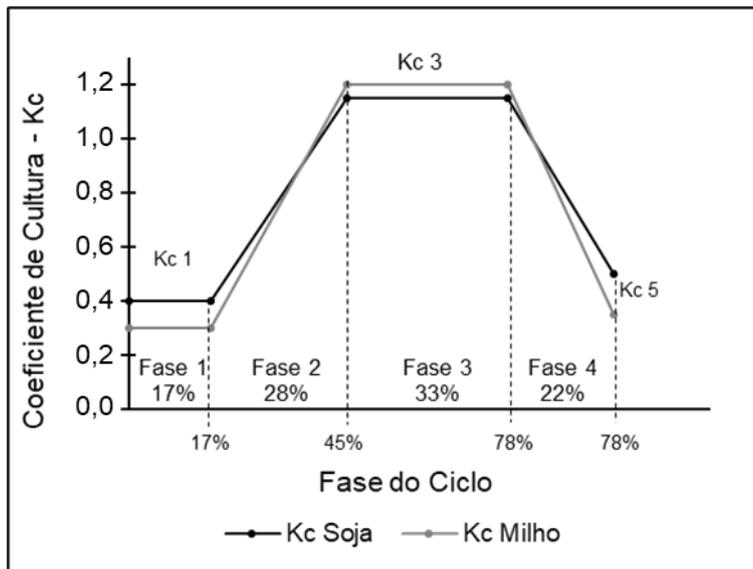


Figura 4 – Valores de  $K_c$  para soja e milho nas diferentes fases do ciclo.  
Fonte: Adaptado de Doorenbos & Pruitt (1977); Allen *et al.* (1998).

De acordo com a Figura 4, o valor de  $K_c$  na fase 1 ( $K_{c1}$  inicial), fase 3 ( $K_{c3}$  médio) e fase 5 ( $K_{c5}$  final), são constantes. Os valores assumidos para as fases 2 variam linearmente entre os valores do ( $K_{c1}$  inicial) e ( $K_{c3}$  médio) e para a fase 4 entre os valores do ( $K_{c3}$  médio) e ( $K_{c5}$  final).

Na metodologia do  $K_c$  dual, o coeficiente da cultura é dividido nos componentes de coeficiente de cultura basal ( $K_{cb}$ ), referente à transpiração da cultura, e no coeficiente de evaporação da água no solo ( $K_e$ ).

O cálculo da  $ET_c$  pela metodologia de  $K_c$  simples tem apresentado resultados satisfatórios, no entanto, esse parâmetro tabelado representa as características da cultura em relação as suas necessidades hídricas, em condições ideais e/ou potencias da planta, o que por vezes não ocorre em condições reais de produção agrícola, devido às adversidades provocadas por exemplo, pelo clima, competitividade de água e nutrientes com plantas espontâneas, problemas fitossanitários, etc. (ALLEN;

TASUMI; TREZZA, 2007; ER-RAKI *et al.*, 2013). Por isso, esses valores devem ser ajustados de acordo com as características locais, visto que, são influenciados pelo tipo de solo, clima, manejos adotados e variedade cultural, a fim de evitar erros na estimativa da  $ET_c$  (ODHIAMBO & IRMAK, 2012).

Para preencher essa lacuna tem-se a metodologia do  $K_c$  dual, que vem sendo pesquisada em diferentes culturas e localidades. Wei *et al.* (2015) e Giménez *et al.* (2017), particionaram a evapotranspiração da soja, nas planícies no norte da China e no oeste do Uruguai, respectivamente. Martins *et al.* (2013) e Rodrigues *et al.* (2013), determinaram os coeficientes basais do milho na região de Santa Maria, RS. Berlato; Matzenauer; Bergamaschi (1986), calcularam a evapotranspiração máxima da soja, através dos dados médios de cinco anos de estudo realizado em diversas localidades do Rio Grande do Sul. Radin *et al.*, (2003), quantificaram a evapotranspiração do milho, em diferentes condições atmosféricas em Eldorado do Sul, RS.

Ambos os métodos de obtenção de  $K_c$  (simples ou dual), dependem da adequada seleção dos valores dos coeficientes de cultivo para cada estágio de desenvolvimento (inicial, intermediário e final), porém o maior desafio das pesquisas é a determinação dos coeficientes ( $K_c$  e  $K_{cb}$ ) nos diferentes estádios da cultura, bem como a determinação da duração de cada estágio.

Allen *et al.* (1998), apontam metodologias para que os valores de  $K_c$  e  $K_{cb}$  possam ser utilizados em diferentes regiões. Allen & Pereira (2009) e Paço *et al.* (2019), apresentam metodologias para a determinação de  $K_c$  e  $K_{cb}$  além da duração dos principais estádios de desenvolvimento das culturas. Entretanto, tais metodologias baseiam-se na determinação de variáveis morfológicas como o índice de área foliar (IAF), altura das plantas ( $h$ ) e fração de cobertura do solo ( $f_c$ ), sendo necessário medições periódicas dessas variáveis.

Dessa forma, os métodos de determinação dos coeficientes de cultura acabam se limitando à aplicabilidade em pesquisa, o que justifica a utilização dos valores tabelados para cultivos comerciais. A utilização de valores tabelados, apesar de ser prática comum, pode ocasionar erros significativos da estimativa do balanço hídrico, resultando em irrigações sub ou superestimadas.

Como alternativa a essas metodologias há a combinação de modelos do balanço hídrico (BH), sensoriamento remoto e informações meteorológicas (GARRIDO-RUBIO *et al.*, 2018; CALERA *et al.*, 2017). Vários estudos têm apontado o potencial do uso de índices de vegetação (IV) derivados de sensoriamento remoto

para a estimativa dos coeficientes de cultivo (POÇAS *et al.*, 2015; CRUZ-BLANCO, LORITE; SANTOS, 2014; PEREIRA *et al.*, 2015; ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007; MATEOS *et al.*; 2013).

#### 2.4.4 Consumo relativo de água ( $ET_r/ET_c$ )

Consumo relativo de água ( $ET_r/ET_c$ ) é um índice que expressa a quantidade de água consumida pela planta em condições naturais de disponibilidade hídrica (evapotranspiração real –  $ET_r$ ) em relação à quantidade de água consumida sem restrição hídrica (evapotranspiração máxima da cultura –  $ET_c$ ), ou seja, é a quantidade de água que a planta consome em relação à quantidade máxima de água que a planta consumiria, sem nenhuma deficiência hídrica. Esse índice varia de zero a um (0 – 1), quanto menor o índice, maior a deficiência hídrica, e quanto mais próximo do valor um, menor a deficiência (MATZENAUER *et al.*, 2002).

No entanto, o impacto do estresse hídrico na produção agrícola depende não só da fase em que o estresse ocorre, mas também da sua duração e intensidade, sabendo disso, diversas pesquisas encontraram alta associação entre o consumo relativo de água com o rendimento de grãos para diferentes fases do desenvolvimento da cultura. No Rio Grande do Sul, Medeiros *et al.* (1991), relacionaram o índice  $ET_r/ET_c$  com o rendimento relativo de grãos de milho durante o período de 1979 a 1986, analisando sete subperíodos e no ciclo da cultura, para as condições da Depressão Central do Rio Grande do Sul. Os autores identificaram que o subperíodo em que as variáveis apresentaram ajuste melhor foi entre dez dias antes do pendoamento até dez dias após o final do espigamento e o valor adequado de  $ET_r/ET_c$  nesse período para a obtenção de rendimento de grãos mais elevados foi de 0,8.

Cunha *et al.* (2001), correlacionaram a produtividade e o índice  $ET_r/ET_c$  para grãos de soja, durante o subperíodo floração-enchimento de grãos quando semeadas entre outubro e dezembro e definiram que o índice classificado como desfavorável ao alto rendimento foi o menor que 0,55. Matzenauer *et al.* (2002), definiram três classes de risco (baixo, médio e alto) de perda de rendimento de grãos de acordo com o índice  $ET_r/ET_c$  para os períodos críticos da soja e milho no Rio Grande do Sul.

#### 2.4.5 Produtividade da água (WP)

A escassez hídrica em diversas localidades e as crescentes demandas de diferentes setores por esse recurso nas últimas décadas, fez crescer as pressões sobre os produtores irrigantes, com o objetivo que se aumente a eficiência da irrigação, ou seja, alcancem maior produtividade com menor volume de água (MOLDEN *et al.*, 2003; MOLDEN *et al.*, 2010). Para avaliar a efetividade da gestão da água da irrigação, surge o termo produtividade da água ou também o encontrado na literatura “colheita por gota”, assunto bastante questionado e as vezes confundido com “eficiência do uso da água”.

Segundo Pereira; Cordery; Iacovides (2012), o termo eficiência é usado na engenharia de irrigação e seus subsistemas (armazenamento, transporte e ainda na distribuição do sistema de irrigação) geralmente expressa em percentuais. Esse termo também é questionado, visto que, ele precisa ser complementado por um indicador de uniformidade de distribuição ou o coeficiente de uniformidade (BURT *et al.*, 1997).

Por outro lado, o termo produtividade da água do inglês (*Water Productivity*) pode ser definido genericamente como a relação entre o rendimento real da cultura ( $Y_a$ ) e o uso da água, expresso em ( $\text{kg m}^{-3}$ ), onde o denominador pode se referir ao uso total de água, incluindo precipitação ou apenas ao uso da água da irrigação, resultando em dois indicadores (PEREIRA; CORDERY; IACOVIDES, 2012).

#### 2.4.6 Índices de vegetação (IV)

O sensoriamento remoto para uso em agricultura vem sendo estudado desde o final da década de 60 e início de 70. Desde então, a comunidade científica busca o desenvolvimento de técnicas a partir da utilização de imagens, principalmente, orbitais. Para isso, diversos estudos vêm sendo conduzidos de modo a aprimorar técnicas de processamento digital de imagens para esse fim, sobretudo no desenvolvimento de índices de Vegetação (IV).

Por definição, o IV é um valor adimensional, que possui a capacidade de determinar a cobertura e densidade vegetal, derivado de operações algébricas entre faixas de reflectância específica, obtidas por combinações de dados espectrais de duas ou mais bandas, que usualmente envolvem a relação inversa entre reflectância da banda do vermelho e do infravermelho próximo associada à vegetação verde saudável (CRUZ; SOUZA; JESUS, 2011).

Jordan (1969), é apontado como o pioneiro dos estudos em IVs, desenvolvendo o Índice de Vegetação da Razão Simples (SR – *Simple Ratio Vegetation Index*). Desde então, visando aperfeiçoar a caracterização da vegetação, inúmeras variações de IVs foram criadas, que podem ser calculadas por razão, diferença, razão de diferenças e somas e pela combinação linear de bandas espectrais (JACKSON & HUETE, 1991). Alguns exemplos são o IV da Diferença Normalizada (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*), desenvolvido por Rouse *et al.* (1973), o IV Ajustado para o Solo (SAVI – *Soil - Adjusted Vegetation Index*), proposto por Huete (1988) e o IV Melhorado (EVI – *Enhanced Vegetation Index*), sugerido por Huete *et al.* (1997).

Valores de  $K_c$  calibrados a partir de IV para diversas culturas, derivados de imagens espectrais oriundas de satélites ou mais recentemente de veículos aéreos não tripulados (VANTS), conhecidos como drones, são amplamente encontrados na literatura. Campos *et al.* (2017), analisaram a relação entre a produção de biomassa e o  $K_c$  baseado em IV derivado do Landsat 5 e Landsat 7, usando dados de campo sobre soja e milho no leste de Nebraska. Eles concluíram que os dados de sensoriamento remoto são eficientes para obter o  $K_c$  e estimar o rendimento das culturas. Bezerra *et al.* (2013), calcularam a  $ET_c$  diária e sazonal da cultura do algodoeiro no estado do Rio Grande do Norte, utilizando o método do  $K_c$  dual obtido em função do NDVI, obtido a partir de imagens TM - Landsat 5 e concluíram que os resultados obtidos se mostraram bastante confiáveis, verificando diferenças menores que 10%, quando comparados com valores da  $ET_c$  obtidos pela técnica da Bowen.

Outros estudos em diferentes culturas e localidades, como os aplicados por González-Dugo *et al.* (2013) e Mateos *et al.* (2013), desenvolvidos em áreas irrigadas, no sul da Espanha e de Poças *et al.* (2015), desenvolvido no sul de Portugal, demonstram que a utilização de IVs de forma combinada com o BH diário possibilita a obtenção de  $K_c$  mais precisos. Além disso, as metodologias utilizadas possibilitam detectar a variabilidade da demanda hídrica dos cultivos, entre diferentes talhões e dentro de um mesmo talhão, aumentando a precisão das recomendações de irrigação.

No Rio Grande do Sul, Kersten (2013) calibrou com êxito o  $K_c$  para milho a partir do NDVI obtido pelo processamento das imagens do sensor OLI (Landsat 8) na região de Júlio de Castilhos. Chechi (2019), utilizou dados de NDVI obtidos através do satélite Sentinel para estimar a fração de cobertura do solo e o índice de área foliar visando calibrar o modelo de balanço hídrico do solo para as culturas de soja e milho na região da Depressão Central e concluiu que a metodologia proposta foi eficiente,

no entanto, em solos de terras baixas, em sistema sulco-camalhão, onde a densidade e arranjo espacial das plantas e propriedades hidráulicas do solo diferem, adequações são necessárias de forma a melhorar a gestão da irrigação.

Além disso, o uso de IVs também é apontado como importante ferramenta na calibração e validação de modelos agrícolas para estimativa de produtividade, visto sua relação com a variabilidade espacial de produção de biomassa vegetal que uma determinada cultura apresenta ao longo do seu ciclo (RICHETTI *et al.*, 2019; CAMPOS *et al.*, 2017; NEALE *et al.*, 2012).

O processamento de imagens para obtenção de IVs pode ser realizado em diferentes ambientes, entre eles, a plataforma do Google Earth Engine (GEE) que se apresenta como importante e inovadora forma de análise multi-temporal (TIAN *et al.*, 2019, SWETNAM *et al.*, 2021).

#### **2.4.6.1 Plataforma Google Earth Engine – GEE**

O *Google Earth Engine* (GEE) é uma plataforma de processamento em nuvem, onde é possível realizar o processamento de elevada quantidade de dados geoespaciais, correspondentes ao ambiente de computação da nuvem Google, possuindo um catálogo de vários petabytes, formado por mais de trinta anos de imagens de satélite e conjuntos de dados geoespaciais gratuitos com recursos de análise em escala planetária (GEE, 2022).

Inclui-se nas coleções de imagens cenas dos satélites Landsat (USGS/NASA), Sentinel, MODIS entre outras, com dados atualizadas diariamente, permitindo aos usuários a detecção de mudanças e tendências na superfície terrestre, nos oceanos e na atmosfera através de um ambiente de desenvolvimento integrado, suportando a implementação de algoritmos de análise e processamento de dados geoespaciais nas linguagens *JavaScript* e *Python* (GORELICK *et al.*, 2017).

Além de dados geoespaciais, também se encontram armazenados na plataforma algoritmos que são facilmente acessados via API (*Application Programming Interface*), além disso, o usuário pode enviar os seus próprios dados produzidos para integrar o banco de dados da nuvem (GANEM, 2017).

Apesar de ser uma plataforma relativamente recente, o GEE tem sido utilizado em uma ampla variedade de pesquisas, englobando tópicos como a mudança na cobertura florestal em escala global (HANSEN *et al.*, 2013), estimativa de produção agrícola (LOBELL *et al.*, 2015), identificação e mapeamento da expansão urbana

(ZHANG *et al.*, 2015), correlação entre desenvolvimento urbano e temperatura da superfície do solo (MAISHELLA; DEWANTORO; AJI, 2020) e no uso de índices de vegetação (HUANG *et al.*, 2017; HUNTINGTON *et al.*, 2016; KELLEY; EVANS; POTTS, 2017). No Brasil, o Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil - MapBiomas utiliza o GEE, disponibilizando scripts de fácil acesso.

### 3 Materiais e métodos

#### 3.1 Balanço hídrico do solo (BH)

##### 3.1.1 Localização e descrição das áreas em estudo

O estudo foi realizado a partir de dados coletados em três safras de verão, 2019/20, 2020/21 e 2021/22, em áreas agrícolas comerciais (Figura 5). O clima da região, segundo classificação Köppen, é do tipo "Cfa", caracterizado como temperado úmido com verões quentes e chuvosos (Dubreuil *et al.*, 2017).

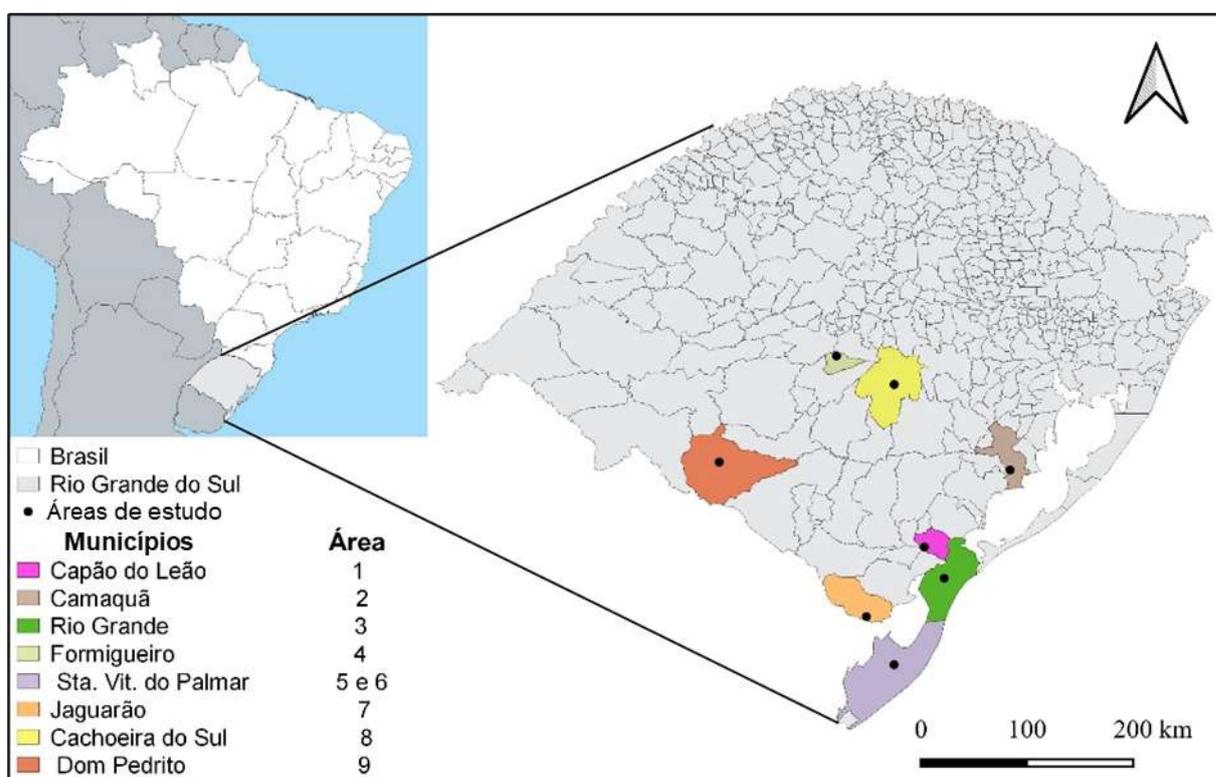


Figura 5 - Localização das áreas agrícolas do estudo

Inicialmente previu-se a implantação de áreas não irrigadas, denominadas de áreas referências, nas mesmas propriedades em que foram implantadas as áreas com a tecnologia sulco-camalhão a fim de posterior comparação. Porém, quando a equipe e seus responsáveis técnicos propuseram a implantação da tecnologia para o cultivo do milho, decidiu-se que não seriam implantadas áreas comerciais de milho em áreas não irrigadas, visto que sem irrigação e drenagem o cultivo do milho em terras baixas seria inviável, de modo que não poderiam propor ao produtor tal risco frente ao alto investimento despendido na implantação de uma lavoura comercial.

A metodologia utilizada para a implementação da tecnologia sulco-camalhão nas áreas em estudo e todas suas etapas, envolvendo o preparo do solo, manejo da fertilidade do solo e adubação, construção dos camalhões, manejo de plantas daninhas e instalação dos politubos, está descrito em Parfitt *et al.* (2021).

Na tabela 1, estão apresentados os dados correspondentes de cada área do presente estudo: tamanho das áreas, coordenadas geográficas, cultivares utilizadas e datas de semeadura e colheita.

Tabela 1 - Dados das áreas em estudo das safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22: tamanho das áreas, município, cultivares, datas de semeadura e datas de colheita.

Area	Area (ha)	Município	Cultura	Cultivar	Data de semeadura	Data de colheita
<b>2019/20</b>						
1	7.4	Capão do Leão	Soja	PIONEER 95R95	27/11/2019	31/03/2020
2	16.5	Camaquã	Soja	DOM MÁRIO 66I68	07/12/2019	02/04/2020
3	10	Rio Grande	Soja	NIDERA 5909	23/11/2019	28/03/2020
<b>2020/21</b>						
1	7.4	Capão do Leão	Soja	PIONEER 95R95	07/11/2020	29/03/2021
2	16.5	Camaquã	Soja	DOM MÁRIO 66I68	25/11/2020	03/04/2021
4	23.3	Formigueiro	Soja	BMX ZEUS IPRO	30/10/2020	19/03/2021
5	13.9	Santa Vitória do	Soja	NIDERA 5909	09/11/2020	29/03/2021
6	9.1	Palmar	Soja	TEC IRGA 6070	16/11/2020	05/04/2021
7	23.7	Jaguarão	Milho	PIONEER 3016	06/11/2020	15/03/2021
<b>2021/22</b>						
1	7.4	Capão do Leão	Soja	PIONEER 95R95	01/12/2021	29/04/2022
4	23.3	Formigueiro	Soja	BMX ZEUS IPRO	25/10/2021	09/03/2022
7	23.7	Jaguarão	Milho	PIONEER 3016	17/11/2022	24/04/2022
8	14	Cachoeira do Sul	Milho	PIONEER 3016	14/10/2021	16/03/2022
9	12	Dom Pedrito	Milho	PIONEER 3016	30/10/2021	14/04/2022

### 3.1.2 Variação do armazenamento de água no solo ( $\Delta ARM$ )

A variação do armazenamento de água no solo ( $\Delta ARM$ ) foi determinada diariamente a partir do modelo de Thornthwaite & Mather (1955), simplificado por (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997) (equação 1).

$$\Delta ARM = P + I - ET_c \quad (1)$$

Em que:

$\Delta ARM$  é a variação do armazenamento de água no solo (mm);

P é a precipitação (mm);

I é a irrigação (mm) e

$ET_c$  é a evapotranspiração da cultura ( $mm \text{ dia}^{-1}$ ). O ARM inicial foi calculado a partir da capacidade de água disponível do solo (CAD) (Equação 2).

$$CAD = \theta_{cc} - \theta_{PMP} \cdot Z_e \quad (2)$$

Em que:

CAD: é a capacidade de água disponível no solo (mm);

$\theta_{cc}$ : umidade volumétrica do solo na capacidade de campo ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ );

$\theta_{PMP}$ : umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ );

$Z_e$ : profundidade efetiva do sistema radicular (mm), para solos de terras baixas, considerou-se 300 mm, conforme indicado (PARFITT; PINTO; TIMM, 2014).

O armazenamento diário de água no solo (ARM) foi determinado a partir das condicionais expostas na tabela 2.

Tabela 2 – Condições utilizadas no modelo do balanço hídrico do solo para determinação do armazenamento diário de água no solo.

Programação	Descrição
Se $\text{ARM}_{i-1} + \Delta\text{ARM} > \text{CAD}$ ; $\text{ARM} = \text{CAD}$	Se o ARM do dia anterior somado à $\Delta\text{ARM}$ do dia atual for maior que a CAD, então o ARM será igual a CAD.
Se $\text{ARM}_{i-1} + \Delta\text{ARM} < 0$ ; $\text{ARM} = 0$	Se o ARM do dia anterior somado à $\Delta\text{ARM}$ do dia atual for menor que “zero”, então o ARM será igual a “zero”.
Se $0 < \text{ARM}_{i-1} + \Delta\text{ARM} < \text{CAD}$ ; $\text{ARM} = \text{ARM}_{i-1} + \Delta\text{ARM}$	Se o ARM do dia anterior somado à $\Delta\text{ARM}$ do dia atual for maior que “zero” e menor que a CAD, então o ARM será o resultante da soma do ARM do dia anterior à $\Delta\text{ARM}$ do dia atual
Se $\text{ARM}_{i-1} + \Delta\text{ARM} < \text{CAD}_{10\%}$ e estágio Vegetativo; $\text{ARM}_{\text{crítico}}$	Armazenamento crítico 1 ocorre quando a cultura estiver no estágio vegetativo e o ARM do dia anterior somado à $\Delta\text{ARM}$ do dia atual for menor que 10% do valor da CAD.
Se $\text{ARM}_{i-1} + \Delta\text{ARM} < \text{CAD}_{20\%}$ e estágio Reprodutivo; $\text{ARM}_{\text{crítico}}$	Armazenamento crítico 2 ocorre quando a cultura estiver no estágio reprodutivo e o ARM do dia anterior somado à $\Delta\text{ARM}$ do dia atual for menor que 20% do valor da CAD.
Se $\text{ARM}_{\text{crítico}} = \text{irrigação}$	Quando a cultura estiver no estágio vegetativo e o ARM chegar no crítico 1 ou a cultura estiver no estágio reprodutivo e o ARM chegar no crítico 2, alerta de irrigação (exceto quando a previsão do tempo indicava chuvas significativas nos dias subsequentes).

A irrigação foi conduzida por polibutos e dimensionada para fornecer uma lâmina de 50 mm em 24 h. Os valores da lâmina de 50 mm bem como os críticos (10% e 20% da CAD), para estágio vegetativo e reprodutivo, respectivamente são determinados em função dos valores da CAD de solos de terras baixas serem próximos de 50 mm. Para que a água da irrigação escoe superficialmente da porção mais elevada da área até a área mais baixa é necessário que o solo esteja em

condição de saturação, para tanto a lâmina de 50 mm se mostra suficiente para tal condição, visto que a irrigação é recomendada quando o solo ainda possui um residual de 10 ou 20% de seu armazenamento total.

Ainda que não se tenha na literatura científica a parametrização de tais valores críticos para as culturas de soja e milho cultivados em sulco-camalhão, esses foram adotados mediante duas situações requeridas pelos produtores: (a) aumentar o período entre irrigações e (b) reduzir irrigações no período vegetativo, evitando riscos de baixa taxa de germinação por encharcamento.

Para a caracterização das frações texturais, foram coletadas amostras de solo sem estrutura preservada na camada de 0-20 cm, realizando-se as determinações seguindo a metodologia de Gee & Bauder (1986). A capacidade de água disponível (CAD) foi determinada através de amostras de solo com estrutura preservada, coletadas com anéis de 5 cm de diâmetro e 3 cm de altura na camada de 0-10 cm, considerando o conteúdo de água retido na tensão 10 kPa como a capacidade de campo e o retido na tensão de 1500 kPa como ponto de murcha permanente, calculada segundo Reichardt & Timm (2012). As análises físicas do solo foram realizadas no Laboratórios do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM) da Universidade Federal de Pelotas (UFPeL). As propriedades hidráulicas do solo, estão apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros físicos dos solos das áreas em estudo: frações granulométricas, umidade volumétrica na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível no solo (CAD)

Área	Granulometria			$\theta_{CC}$	$\theta_{PMP}$	CAD
	Areia	Silte %	Argila			
1	46,0	46,0	8,0	0,326	0,160	49,8
2	41,7	44,5	13,8	0,332	0,163	50,7
3	37,0	41,0	22,0	0,313	0,138	52,5
4	20,5	54,5	24,5	0,302	0,115	56,1
5	47,7	38,5	13,8	0,313	0,142	51,3
6	41,6	44,5	13,9	0,332	0,162	51,0
7	35,2	42,5	22,2	0,323	0,138	55,5
8	36,0	32,3	31,7	0,327	0,132	58,5
9	14,9	57,9	27,2	0,321	0,132	56,7

$\theta_{CC}$ : umidade na capacidade de campo ( $cm^3.cm^{-3}$ );  $\theta_{PMP}$ : umidade no ponto de murcha permanente ( $cm^3.cm^{-3}$ ); CAD: capacidade de água disponível do solo (mm).

### 3.1.3 Estimativa da precipitação efetiva ( $P_{ef}$ )

Os dados de precipitação foram obtidos em cada lavoura, onde os produtores tinham um pluviômetro convencional instalado. A precipitação efetiva ( $P_{ef}$ ) foi

calculada como a diferença entre a precipitação bruta ( $P$ ) e o escoamento superficial ( $P_{es}$ ). Para cálculo da  $P_{es}$  foi utilizado o modelo CN-SCS padrão.

De acordo com o método, a chuva infiltrada dado de interesse para a irrigação ( $P_{ef}$ ) é calculada como a diferença entre a precipitação ( $P$ ) e a chuva escoada ( $P_{es}$ ) (Equação 3).

$$P_{ef} = P - P_{es} \quad (3)$$

Em que:

$P_{ef}$ : é a precipitação efetiva ou infiltrada no solo (mm);

$P$ : é a precipitação bruta total (mm) e

$P_{es}$ : é a precipitação escoada (mm), determinada pelo método SCS-CN.

A partir disso, as iterações matemáticas do método SCS-CN podem ser explicadas a partir da associação de duas hipóteses fundamentais.

- Hipótese 1: considera que a razão entre o escoamento superficial ( $P_{es}$ ) e o escoamento superficial máximo potencial ( $P - I_a$ ) é igual à razão entre a retenção real ( $P - I_a - P_{es}$ ) e a retenção potencial máxima ( $S$ , mm). Onde  $I_a$  é abstração inicial.
- Hipótese 2: considera uma relação linear entre as variáveis ( $S$  e  $I_a$ ), estabelecendo  $\lambda$  igual a 0,2, ou seja, que as perdas iniciais ( $I_a$ ) correspondem a 20% da máxima infiltração acumulada potencial ( $S$ ) (Equação 4 e 5):

$$I_a = \lambda \cdot S \quad (4)$$

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (5)$$

Combinando as duas hipóteses fundamentais é possível chegar à estimativa do escoamento superficial (Equações 6):

$$P_{es} = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{Se } P > I_a; P_{es} = 0 \text{ se } P \leq I_a \quad (6)$$

Como o modelo padrão assume um valor empírico da taxa de captação inicial ( $\lambda$ ) de 20% da retenção potencial máxima,  $I_a = 0,2 \cdot S$ , a equação 2 é reescrita conforme equação 7.

$$P_{es} = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad \text{para } P > I_a; P_{ef} = 0 \text{ se } P \leq I_a \quad (7)$$

Já o valor de  $S$  é relacionado com o parâmetro CN (Equação 8):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad 0 < CN \leq 100 \quad (8)$$

Em que CN é um parâmetro adimensional tabelado, que varia de 0 a 100, sendo que 0 corresponde a um solo de capacidade de infiltração infinita e 100 um solo completamente impermeável. O valor de CN tabelado corresponde a uma condição de umidade média, denominado CN<sub>II</sub> e está associado à condição de umidade antecedente dos últimos cinco dias do inglês (*Antecedent Moisture Condition-AMC II*).

Para a estimativa do parâmetro CN deve-se seguir o seguinte roteiro (SETZER & PORTO, 1979):

- 1) Escolha das condições iniciais de saturação do solo (Tabela 4):

Tabela 4 - Condições de umidade antecedente do solo, consideradas pelo SCS para escolha do CN

AMC	Descrição
I	Solos secos: as chuvas, nos últimos cinco dias, não ultrapassaram 15 mm
II	Situação média na época das cheias: as chuvas, nos últimos cinco dias, totalizaram de 15 a 40 mm.
III	Solo úmido (próximo da saturação): as chuvas, nos últimos cinco dias, foram superiores a 40mm, e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação

- 2) Identificação do grupo hidrológico do solo: entre A, B, C e D descritos em ordem crescente de potencial de geração de escoamento superficial na (Tabela 5):

Tabela 5 – Tipos de solos considerados no método SCS-CN para a determinação do parâmetro CN

TIPO	Características
A	Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8%, não havendo rocha nem camadas argilosas, e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5 m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.
B	Solos arenosos menos profundos que os do grupo A e com maior teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, esse limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5 m, mas é, quase sempre, presente mais densificada que a camada superficial.
C	Solos barrentos com teor de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidades de 1,2 m. No caso de terras roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5 m. Nota-se a cerca de 0,6 m de profundidade, camada mais densificada que no grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.
D	Solos argilosos (30 - 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 0,5 m de profundidade. Ou solos arenosos como do grupo B, mas com camada argilosa quase impermeável, ou horizonte de seixos rolados.

## 3) Determinação do CN para a condição II por meio da Tabela de CN (Tabela 6):

Tabela 6 - Valores de CN em função da cobertura do solo e do tipo hidrológico de solo, para a condição de umidade II em bacias rurais

Uso do solo	Superfície	Grupo hidrológico			
		A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
	boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curva de nível	47	67	81	88
	Normais, em curva de nível	25	59	75	83
	Boas, em curva de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsos, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normais	36	60	73	79
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras	Normais	56	75	86	91
Estradas não pavimentadas	Mal conservadas	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

- 4) Quando os solos se enquadram em AMC I ou AMC III, deve-se corrigir o CN para a condição de saturação do solo para AMC II, através das (equações 9 e 10), respectivamente (CHOW *et al.*, 1988; MELLO & SILVA, 2013).

$$CN_I = \frac{4,2 \cdot CN_{II}}{(10,0 - 0,058 \cdot CN_{II})} \quad (9)$$

$$CN_{III} = \frac{23 \cdot CN_{II}}{(10,0 + 0,13 \cdot CN_{II})} \quad (10)$$

Assim, entre as quatro opções de tipos de solo tabelados considerados no método SCS-CN identificou-se o grupo hidrológico D como o grupo que melhor classifica os solos de terras baixas, e a partir dessa classificação, junto à classificação do uso (plantações regulares) e de superfície (em fileiras retas) estimou-se o  $CN_{II}$  igual a 88 (para a condição de umidade AMII).

### 3.1.4 Estimativa da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>)

A evapotranspiração diária das culturas de soja e milho (ET<sub>c</sub>) foram calculadas pelo método proposto por Allen *et al.* (1998) (equação 11).

$$ET_c = ET_o \cdot K_c \quad (11)$$

Em que:

ET<sub>c</sub>: é a evapotranspiração da cultura (mm dia<sup>-1</sup>);

ET<sub>o</sub> é a evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>) e

K<sub>c</sub> é coeficiente da cultura.

Os dados diários de ET<sub>o</sub> foram obtidos gratuitamente a partir das estações convencionais mais próximas das áreas experimentais. Os dados estão disponíveis através dos portais <http://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/monitoramento/bhc/> e <http://agromet.cpact.embrapa.br/>.

Ao invés de utilizar o K<sub>c</sub> da soja e do milho tabelado no boletim FAO-56, optou-se por utilizar dados gerados a partir de observações mais próximas da localidade de estudo, embora não desenvolvidos exclusivamente em solos de terras baixas, esses foram selecionados mediante ao maior tempo de estudo e/ou diversidade das condições edafoclimatológicas.

Assim, o K<sub>c</sub> da soja foi calculado a partir da adaptação dos resultados de Berlato; Matzenauer; Bergamaschi (1986), onde obtiveram dados médios de cinco anos de estudo realizado em diversas localidades do Rio Grande do Sul (equação 12) e o K<sub>c</sub> do milho, adaptado de Radin *et al.* (2003), em estudo realizado por quatro anos em Eldorado do Sul, RS (equação 13).

$$K_{c_{soja}} = -9E-05DAS^2 + 0,0173DAS + 0,3812 \quad (12)$$

$$K_{c_{milho}} = -0,000157DAS^2 + 0,0241DAS + 0,421 \quad (13)$$

Em que, DAS é dias após a semeadura.

### 3.1.5 Estimativa da evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>)

Para estimar a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>), o deficit hídrico (DEF) e o excedente hídrico (EXC), utilizou-se o método de Thornthwaite & Mather (1955), desconsiderando a entrada da irrigação, conforme os critérios descritos nas equações de 14 a 24. Esse BH sem entradas de irrigação foi denominado de sequeiro simulado.

$$\text{NegAcu} = 0 \rightarrow \text{Se } (P - ET_c) \geq 0 \quad (14)$$

$$\text{NegAcu} = \text{NegAcu}_{i-1} + (P - ET_c) \rightarrow \text{Se } (P - ET_c) < 0 \quad (15)$$

$$\text{NegAcu} = \text{CAD} \ln(\text{ARM}/\text{CAD}) \rightarrow \text{para períodos chuvosos} > 1 \text{ dia} \quad (16)$$

$$\text{ARM} = \text{CAD} \rightarrow \text{Se } \text{NegAcu} = 0 \quad (17)$$

$$\text{ARM} = \text{CAD} e^{[\text{NegAcu}/\text{CAD}]} \rightarrow \text{Se } \text{NegAcu} < 0 \quad (18)$$

$$\text{ARM}_i = \text{ARM}_{i-1} + (P - ET_c) \rightarrow \text{para períodos chuvosos} > 1 \text{ dia} \quad (19)$$

Em que:

NegAcu é o negativo acumulado (mm): é a soma da perda potencial acumulada sendo diferente de "0" quando há uma sequência de período sem precipitação, ou seja, a água retida no solo será uma função sequencial dos valores negativos acumulados ( $P - ET_c$ ).

P a precipitação infiltrada (mm);

$ET_c$  a evapotranspiração da cultura (mm);

ARM o armazenamento de água no solo em condições de retirada de água do solo (mm) e CAD a capacidade de água disponível no solo (mm).

Obs: para o último critério, o ARM é calculado primeiro.

$$\text{ALT} = \text{ARM}_i - \text{ARM}_{i-1} \quad (20)$$

Em que:

ALT é a alteração da umidade do solo (mm);  $\text{ARM}_i$  o armazenamento atual (mm) e  $\text{ARM}_{i-1}$  o armazenamento do dia anterior (mm).

$$ET_r = ET_c \rightarrow \text{Se } (P - ET_c) \geq 0 \quad (21)$$

$$ET_r = P - \text{ALT} \rightarrow \text{Se } (P - ET_c) < 0 \quad (22)$$

$$\text{DEF} = ET_c - ET_r \quad (23)$$

$$\text{EXC} = (P - ET_c) - \text{ALT} \rightarrow \text{Se } (P - ET_c) > 0 \text{ e } \text{ARM} = \text{CAD} \quad (24)$$

Em que:

$ET_r$  é a evapotranspiração real (mm);

DEF e EXC são a deficiência e excesso hídrico (mm).

A partir disso, foi possível calcular a estimativa do consumo relativo de água ( $ET_r/ET_c$ ), que foi obtida somente para os períodos críticos das culturas, ou seja, para a soja do início da floração até o início do enchimento de grãos (R1-R5), e para o milho do início do pendoamento até 30 dias após, que engloba a floração e o início do enchimento de grãos, conforme a Tabela 7 (MATZENAUER *et al.*, 2002).

Tabela 7 – Risco de perda de rendimento de grãos de soja e milho de acordo com o índice ETr/ ET<sub>c</sub>

<b>Índice de risco</b>	<b>Soja</b>	<b>Milho</b>
Baixo risco	$ETr/ET_c > 0,60$	$ETr/ET_c > 0,70$
Médio risco	$0,60 \geq ETr/ET_c > 0,40$	$0,70 \geq ETr/ET_c > 0,50$
Alto risco	$ETr/ET_c < 0,40$	$ETr/ET_c < 0,50$

### 3.1.6 Estimativa da produtividade da água

Para analisar o uso água, foram utilizados indicadores de produtividade da água WP (kg m<sup>-3</sup>), expressos pela razão entre a produtividade da cultura (Y<sub>a</sub>) e a água utilizada correspondente (PEREIRA; CORDERY; IACOVIDES, 2012). Estimou-se a produtividade total da água (WP<sub>Total</sub>) (equação 25) e a produtividade da água da irrigação WP<sub>Irrig</sub> (kg m<sup>-3</sup>) (equação 26).

$$WP_{Total} = \frac{Y_a}{TWU} = \frac{Y_a}{P + I + \Delta ARM_{f-i}} \quad (25)$$

$$WP_{Irrig} = \frac{Y_a}{IWU} = \frac{Y_a}{I} \quad (26)$$

Em que,

Y<sub>a</sub>: é a produção total de grãos da cultura obtida na área de estudo (kg);

TWU: é o volume total de água utilizada (m<sup>3</sup>) (*Total Water Used*);

IWU: é o volume total de água utilizada na irrigação (m<sup>3</sup>);

P: é o volume total de precipitação efetiva recebida no ciclo da cultura (m<sup>3</sup>);

I: é o volume total de irrigação recebido no ciclo da cultura (m<sup>3</sup>);

$\Delta ARM_{f-i}$ : é a diferença no armazenamento de água no solo entre a semeadura e a colheita (m<sup>3</sup>), ou seja, excluindo desse cálculo o armazenamento de água restante no solo após a colheita.

## 3.2 Ajustes dos parâmetros (ET<sub>c</sub> e P<sub>ef</sub>)

### 3.2.1 Estimativa da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) a partir do NDVI

#### 3.2.1.1 Séries temporais dos índices de vegetação

Foi utilizada a coleção de dados das imagens derivadas do Sensor OLI, plataforma Landsat-8 com correção atmosférica TOA (*Top of Atmosphere*), a

aquisição dos dados foi realizada através da plataforma Google Earth Engine (GEE), disponível em <https://code.earthengine.google.com>.

Comandos Javascript do GEE Code Editor foram desenvolvidos para extrair os IVs, a primeira etapa do algoritmo consiste em definir a órbita/ponto a ser analisada e o intervalo temporal. A existência de uma área de sobreposição de aproximadamente 15 km sobre as duas órbitas nas áreas de estudo, permitiu adquirir maior número de imagens para algumas áreas, o que possibilitou a redução da resolução temporal do sensor que é de 16 dias, obtendo um maior número de informações para cada área.

A análise temporal foi realizada conforme a data de semeadura de cada área. Em seguida, foram aplicadas máscaras de nuvens e sombras de nuvens, sendo excluídos da análise os valores de refletância contendo estas feições. Posteriormente ao pré-processamento foram realizadas as operações algébricas entre as bandas para obtenção dos IVs. Para a estimativa das  $ET_c$  de soja e milho, foram utilizados valores calculados de NDVI. Além disso, a produtividade das culturas de soja e milho foi estimada através do NDVI e outros IVs como SAVI, EVI e SR, conforme as equações apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Índices de vegetação utilizados para estimativa do  $K_c$  (NDVI) e produtividade das culturas

Índice de vegetação (IV)	Equação	Referência
NDVI - Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	(ROUSE <i>et al.</i> , 1973)
SAVI - Soil-Adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{(1+L)*(NIR - RED)}{NIR + RED + Ls}$	(HUETE, 1988)
EVI - Enhanced Vegetation Index	$EVI = G \times \frac{NIR - RED}{NIR + C1*RED - C2*5BLUE + Le}$	(JUSTICE <i>et al.</i> , 1998)
SR - Simple Ratio	$SR = \frac{NIR}{RED}$	(JORDAN, 1969)

Sensor OLI: (B2) AZUL - (0,45 a 0,51  $\mu\text{m}$ ), (B4) VERMELHO - (0,64 a 0,67  $\mu\text{m}$ ) e (B5) NIR - (0,79 a 0,89  $\mu\text{m}$ ); resolução espacial de 30 m;  $Ls = 0,5$  e  $Le = 1$  (fator de ajuste para solo);  $G = 2,5$  (fator de ganho);  $C1 = 6$  e  $C2 = 7,5$  (coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera).

Após isso, foi criado o comando para criar gráfico da série temporal para cada área, onde foi possível obter as séries dos IVs médio de todos os pixels da área selecionada e baixados como arquivo .csv, o script com o código desenvolvido está em (Apêndice A). A relação das datas de aquisição das séries de IVs nas safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22 nas áreas de estudo, está na Tabela 9.

Tabela 9 - Data das imagens do sensor OLI (Landsat-8) utilizadas para calcular os índices de vegetação para servir como variáveis predictoras nos modelos da presente pesquisa

Séries de IVs do ano-safra 2019/20			Séries de IVs do ano-safra 2020/21						
Áreas experimentais									
1	2	3	1	2	4	5	6	7	
10/11/2019	06/01/2020	21/11/2019	21/11/2020	21/11/2020	19/11/2020	14/12/2020	14/12/2020	-	
19/11/2019	07/02/2020	14/12/2019	14/12/2020	23/12/2020	05/12/2020	08/01/2021	30/12/2020	-	
28/12/2019	23/02/2020	30/12/2019	23/12/2020	08/01/2021	21/12/2020	25/02/2021	25/02/2021	-	
06/01/2020	10/03/2020	08/01/2020	30/12/2020	09/02/2021	30/12/2020	13/03/2021	13/03/2021	-	
13/01/2020		15/01/2020	08/01/2021	25/02/2021	06/01/2021	20/03/2021	20/03/2021	-	
07/02/2020		25/02/2020	25/02/2021	13/03/2021	15/01/2021	29/03/2021	29/03/2021	-	
23/02/2020		13/03/2020	13/03/2021	29/03/2021	22/01/2021			-	
01/03/2020		20/03/2020	20/03/2021		07/02/2021			-	
17/03/2020		29/03/2020	29/03/2021		11/03/2021			-	
26/03/2020					20/03/2021			-	
Séries de IVs do ano-safra 2021/22									
Áreas experimentais									
1	4	7	8	9					
01/12/2021	30/10/2021	01/12/2021	30/10/2021	22/11/2021					
08/12/2021	15/11/2021	03/02/2022	15/11/2021	08/12/2021					
10/02/2022	22/11/2021	23/03/2022	01/12/2021	24/12/2021					
19/02/2022	01/12/2021	08/04/2022	17/12/2021	09/01/2022					
23/03/2022	08/12/2021		02/01/2022	25/01/2022					
17/04/2022	17/12/2021		03/02/2022	10/02/2022					
24/04/2022	24/12/2021		19/02/2022	26/02/2022					
	09/01/2022		07/03/2022	14/03/2022					
	19/02/2022			30/03/2022					
	26/02/2022								
	07/03/2022								

### 3.2.1.2 Evapotranspiração da cultura – $ET_c$ (NDVI)

Dentre as séries de IVs disponíveis (Tabela 9), utilizou-se o NDVI para a estimativa do  $K_c$  devido a esse ter como característica a forte sensibilidade nos estádios fenológicos iniciais das culturas, o que permite um melhor ajuste às fases da curva de  $K_c$  proposta por Doorenbos & Pruitt (1977). A partir disso, seguiu-se a metodologia descrita nos trabalhos de Bezerra *et al.* (2010) e Kamble; Irmak; Hubbard (2013), identificando na série de NDVI, os valores iniciais, máximos e finais, assim como os valores do  $K_c$  tabelado obtidos do boletim FAO-56, assim obtendo-se duas séries de mesmo tamanho. Após, utilizou-se o modelo de regressão linear simples, para obter a equação e estabelecer os novos coeficientes de cultivo das cultivares de soja  $K_c$  (NDVI).

De posse dos valores de  $K_c$  (NDVI), obtidos através do modelo de regressão linear, juntamente com os valores de evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), foram obtidos os valores da evapotranspiração da cultura em  $mm\ dia^{-1}$  (Equação 27) (ALLEN *et al.*, 1998).

$$ET_{c\ (NDVI)} = ET_o \cdot K_{c\ (NDVI)} \quad (27)$$

Em que:

$ET_c$  (NDVI) é a evapotranspiração da cultura estimada por meio do sensoriamento remoto ( $\text{mm dia}^{-1}$ );

$ET_o$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) e

$K_c$  (NDVI) é o  $K_c$  calculado por meio da correlação entre o NDVI e o  $K_c$  (FAO-56).

A  $ET_c$  (FAO-56) foi calculada pelo método proposto por Allen *et al.* (1998), (equação 27), contudo, utilizando os valores de  $K_c$  tabelado na literatura internacional, neste caso, o  $K_c$  tabelado no boletim FAO-56.

De acordo com o método da FAO, para a estimativa de valores de coeficiente de cultura ( $K_c$ ), a cultura de ciclo anual é dividida em quatro fases do ciclo fenológico (DOORENBOS & PRUITT, 1977).

O valor de  $K_c$  na fase 1 ( $K_{c1}$  inicial), fase 3 ( $K_{c3}$  médio) e fase 5 ( $K_{c5}$  final), são constantes. Os valores assumidos para as fases 2 variam linearmente entre os valores do ( $K_{c1}$  inicial) e ( $K_{c3}$  médio) e para a fase 4 entre os valores do ( $K_{c3}$  médio) e ( $K_{c5}$  final).

Adotou-se os seguintes valores para a cultura da soja  $K_c 1 = 0,5$ ;  $K_c 3 = 1,15$  e  $K_c 5 = 0,5$  para a cultura da soja e  $K_c 1 = 0,3$ ;  $K_c 3 = 1,2$  e  $K_c 5 = 0,35$  para o milho.

### 3.2.1.3 Estimativa de produtividade ( $WP_{\text{Total}}$ e $WP_{\text{Irrig}}$ )

A partir da relação da variável dependente (produtividade), observada em cada área nas safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22, informada pelos produtores após ajuste para o teor de umidade de grãos de 13%, com a variável independente (IVs), sendo eles: NDVI, SAVI, EVI e SR, foi realizada a regressão linear para gerar uma equação capaz de estimar a produtividade de safras futuras a partir de dados de IVs. Para isso, selecionou-se os máximos IVs das séries obtidas, visto que esses se relacionam à época próxima ao máximo estágio vegetativo da soja, o qual coincide com a entrada da cultura em fase reprodutiva, segundo Yang *et al.* (2000), esse é o período ideal para coleta de dados para estimativa de produtividade de grãos, por demonstrar padrões mais estáveis e representativos.

## 3.2.2 Estimativa da precipitação efetiva ( $P_{\text{ef}}$ ) a partir de dados observados

### 3.2.2.1 Descrição do local de estudo

O experimento foi conduzido na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, no município de Capão do Leão, RS ( $31^{\circ}49'1,43''$  S e  $52^{\circ}28'8,54''$  O) (Figura 6).

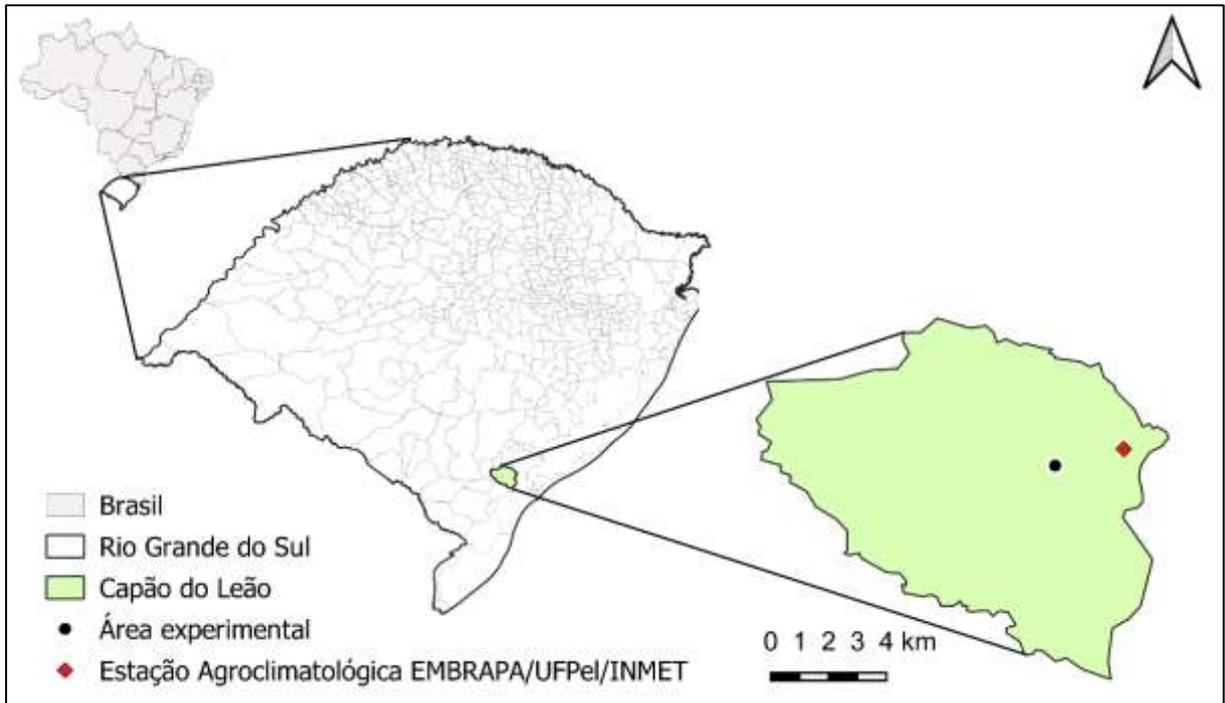


Figura 6 - Localização da área experimental

### 3.2.2.2 Caracterização físico-hídrica do solo

A distribuição granulométrica e a capacidade de água disponível no solo (CAD), foram determinadas a partir dos resultados obtidos por Parfitt (2009) de acordo com a classe textural e estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Propriedade hidráulicas do solo

Parâmetro	Valor
Conteúdo de água na saturação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0,41
Conteúdo de água na capacidade de campo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0,31
Conteúdo de água no ponto de murcha permanente ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0,19
Areia (%)	45,8
Silte (%)	39,86
Argila (%)	14,34
Textura do solo	Franca

### 3.2.2.3 Experimento de campo e coleta de dados

O experimento ocorreu no período de 26 de julho a 04 de outubro de 2021, em uma área de 1,1 ha, 0,3% de declividade, suavizada com o sistema sulco-camalhão implementado em fevereiro de 2020. A metodologia utilizada para a implementação da tecnologia sulco-camalhão na área em estudo e todas suas etapas, está descrito em Parfitt *et al.* (2021). A área foi semeada com azevém (*Lolium multiflorum*) para cobertura do solo no inverno e cultivo de soja no verão seguinte.

O escoamento superficial foi coletado a jusante da microdrenagem, por um sistema de condução em paralelo formado por uma tubulação de aço galvanizado de 1,2 m de comprimento e 250 mm de diâmetro, com reduções de 250 para 100 mm, 100 para 50 mm e 50 para 19,05 mm ( $\frac{3}{4}$ "), onde foram conectados três hidrômetros para água fria, multijato, magnético, da marca LAO, modelo MJ9B4, de vazão nominal de  $5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  (Figura 7).

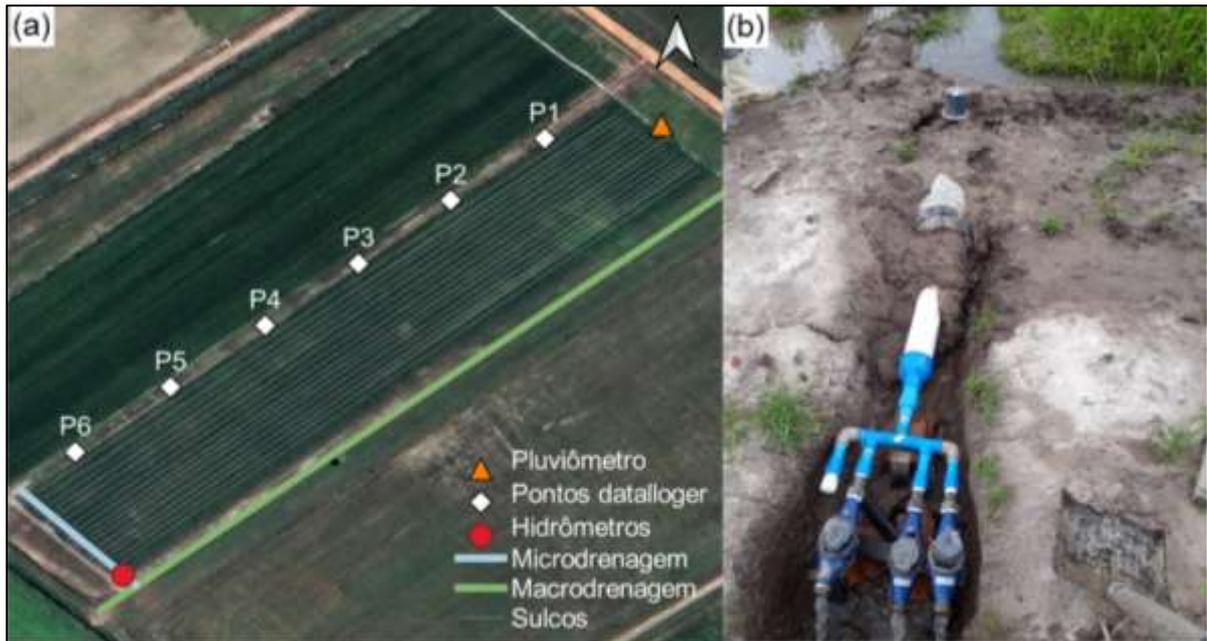


Figura 7 - (a) Distribuição espacial da área de estudo: pluviômetro, pontos de instalação dos dataloggers, hidrômetros e as linhas de fluxos hídricos (micro drenagem, macrodrenagem e sulcos) e (b) ponto de instalação dos hidrômetros.

Os valores de escoamento, foram medidos a partir do dia 26 de agosto de 2021, imediatamente após os eventos de precipitação, com leituras diárias e acumuladas por evento de precipitação até o cessar do escoamento.

Foi monitorada a tensão de água no solo de cada parcela através de sensores Watermark®. Em cada ponto de instalação, foram utilizados três sensores de umidade (um no sulco a 0,10 m e dois no camalhão a 0,10 e 0,25 m de profundidade) e um sensor de temperatura. As leituras horárias de tensão de água no solo, durante todo o ciclo, foram armazenadas em dataloggers e transformadas em médias diárias.

Os seis dataloggers foram instalados recuados de 30 m das bordas superior e inferior, distanciados a cada 45 m de largura e declividade de 0,3%, foram agrupadas em 1 e 2, 3 e 4 e 5 e 6, denominadas de terço superior (TS), terço médio (TM) e terço inferior (TI), respectivamente. O sulcos-camalhões foram construídos para que o fluxo hídrico tenha sentido da parcela 1 para a parcela 6. Após a parcela 6 e perpendicular

ao fluxo hídrico dos sulcos está localizada o canal de micro drenagem, que conduz o escoamento hídrico até a macrodrenagem.

### 3.2.2.4 Método SCS-CN padrão

Entre as quatro opções de tipos de solo tabelados e considerados no método SCS-CN padrão, identificou-se o grupo hidrológico D como o grupo que melhor classifica os solos de terras baixas, e a partir dessa classificação, junto à classificação do uso (Pastagens) e de superfície (Normais) estimou-se o  $CN_{II}$  igual a 83 (para a condição de umidade AMII). O  $CN_{II}$  foi corrigido utilizando (equações 9 e 10), respectivamente quando (as chuvas nos últimos 5 dias não ultrapassaram 15 mm)  $CN_I$  (AMC I), ou condição (quando as chuvas nos últimos cinco dias são superiores a 40 mm)  $CN_{III}$  (AMC III) (CHOW *et al.*, 1988; MELLO & SILVA, 2013).

### 3.2.2.5 Obtenção dos parâmetros modificados CN ( $CN_m$ ) e $\lambda$ ( $\lambda_m$ )

A partir dos dados experimentais de precipitação e seu volume escoado superficialmente foi possível obter novos valores de CN conforme equação 28 (HAWKINS, 1973).

$$CN = \frac{25400}{254 + 5[(P + 2P_{es}) - \sqrt{P_{es}(4P_{es} + 5P)}]} \quad (28)$$

A média desses novos valores de CN calculados para cada evento de precipitação foi utilizada como um novo valor teórico de  $CN_{II}$  e esse novo  $CN_{II}$  utilizado para correção dos  $CN_I$  e  $CN_{III}$ , retornando as equações 9 e 10, respectivamente.

Com o intuito de obter a melhor concordância possível entre o escoamento simulado pelo modelo e o escoamento observado, foi calculado o valor otimizado dos parâmetros  $CN_I$ ,  $CN_{II}$ ,  $CN_{III}$  e ainda da taxa de captação inicial  $\lambda$ , através da ferramenta Solver, da planilha eletrônica Excel®, onde a técnica iterativa não linear de ajuste dos mínimos quadrados (Função Objetivo – FO), foi usada para minimizar a soma da diferença quadrada entre o escoamento simulado e o observado (equação 29). Para tanto, foi utilizado o algoritmo de gradiente reduzido generalizado (GRG).

$$FO = \min \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \quad (29)$$

Após isso, retornou-se à equação 7 substituindo os novos parâmetros obtidos, sendo o valor de 0,2 substituído pela nova  $\lambda$ , denominado de  $\lambda_m$  (taxa de captação inicial modificado) e 0,8 sendo  $(1-\lambda)$ .

### 3.2.2.6 Balanço hídrico do solo após a obtenção dos parâmetros ( $CN_m$ ) e $\lambda$ ( $\lambda_m$ )

Os valores medidos de tensão (kPa) média para as três profundidades de cada terço da área experimental foram convertidos em  $\theta$  ( $cm^3\ cm^{-3}$ ), através do ajuste da curva de retenção de água no solo, por meio do modelo proposto por VAN GENUCHTEN (1980).

Para cada terço da área, profundidade e data de medição, foi calculado um único valor de armazenamento no solo (ARM, mm) utilizando-se a média dos dois valores de  $\theta$  medidos. A partir dessas medições médias, foram calculados os valores de TSC10, TMC10 e TIC10 (terços superior, médio e inferior no camalhão – profundidade 10 cm), TSC25, TMC25 e TIC25 (terços superior, médio e inferior no camalhão – profundidade 25 cm), TSS10, TMS10 e TIS10 (terços superior, médio e inferior no sulco - profundidade 10 cm).

Os valores do ARM foram obtidos seguindo o modelo de Thornthwaite & Mather (1955), simplificado por Pereira; Villa Nova; Sedyama (1997), a variação de armazenamento  $\Delta ARM$  considerou os mesmos componentes do BH (Equação 1). Porém, a contabilização da precipitação infiltrada ( $P_{ef}$ ) foi realizada pelo modelo SCS- $CN_m$  modificado. A  $ET_c$  diária foi calculada através da multiplicação do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) e a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ). O  $K_c$  (Tabela 11) e as durações dos estádios de desenvolvimento da cultura do azevém foram determinadas de acordo com a FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998). A  $ET_o$  diária foi obtida na estação Agroclimatológica convênio EMBRAPA/UFPel/INMET.

Tabela 11 - Coeficiente de cultura do azevém

Cultura	$K_c$ inicial	$K_c$ intermediário	$K_c$ final
Azevém	0,95	1,05	1

### 3.2.3 Análise dos dados

Calculou-se o RMSE - *Root of Mean Square Error* (quadrado médio do erro), equação 32 e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), equação 33, em três momentos: (a) comparação dos valores encontrados da  $ET_c$  diária, para cada uma das áreas experimentais nas três safras  $ET_c$  (FAO-56) e da  $ET_c$  (NDVI), calculada por meio do

sensoriamento remoto; (b) comparação da produtividade de grãos observada e estimada com base nos IVs (NDVI, SAVI, EVI e SR) e (c) Para avaliação entre  $\Delta\text{ARM}$  medido e  $\Delta\text{ARM}$  estimado através dos modelos SCS-CN e SCS-CN<sub>m</sub>.

$$\text{RMSE} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2 \right]^{1/2} \quad (32)$$

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}} \right)^2 \quad (33)$$

A comparação entre os valores de volumes de  $P_{es}$  observados e estimados pelo método SCS-CN padrão e pelo método SCS-CN<sub>m</sub> modificado foram feitas através do coeficiente de determinação  $R^2$  (equação 33). A eficiência do modelo foi calculada conforme proposto por NASH e SUTCLIFFE, (1970) (Equação 34).

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (34)$$

Em que,  $n$  é o número de observações;  $O$  é o valor observado;  $E$  é o valor estimado;  $\bar{O}$  é o valor médio observado e  $\bar{E}$  é o valor médio estimado.

## 4 Resultados e discussão

### 4.1 Balanço hídrico do ano-safra 2019/20

Os componentes do balanço hídrico, do ano-safra 2019/20, estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Componentes do balanço hídrico referente às áreas de soja, irrigada e de sequeiro simulado, cultivadas em sulco-camalhão na safra 2019/20.

	Área	Cultura	P	P <sub>ef</sub>	P <sub>es</sub>	I	ET <sub>c</sub>	ET <sub>r</sub> /ET <sub>c</sub>	Risco
			Acumulado (mm)						
Irigada	1	Soja	87,5	80,4	7,1	250	348,67	0,60	Médio
Sequeiro simulado				80,4	7,1	0		0,22	Alto
Irigada	2	Soja	256,0	207,2	48,8	250	399,79	0,67	Baixo
Sequeiro simulado				210,9	45,1	0		0,27	Alto
Irigada	3	Soja	156,0	136,6	19,2	250	361,48	0,75	Baixo
Sequeiro simulado				137,5	18,5	0		0,19	Alto

P: precipitação; P<sub>ef</sub>: precipitação efetiva; P<sub>es</sub>: escoamento superficial; I: irrigação; ET<sub>c</sub>: evapotranspiração da cultura; ET<sub>r</sub>/ET<sub>c</sub>: índice de consumo relativo de água e sua classificação de risco.

Os resultados dos balanços hídricos demonstram que os volumes das precipitações efetivas foram inferiores aos da demanda hídrica nas três áreas. O melhor aproveitamento da água precipitada, ocorreu na área 1 (Capão do Leão), onde observa-se baixos valores de escoamento superficial, tanto em sequeiro simulado como no irrigado. Essa menor perda por escoamento, pode estar ligada a dois fatores: (a) a intensidade das precipitações e (b) à baixa umidade do solo devido aos baixos valores precipitados, apresentando, portanto, maior infiltração. No entanto, as intensidades das precipitações não foram avaliadas neste estudo.

Conforme a classificação das áreas de risco, verifica-se nas três áreas de estudo que no cenário real (irrigado) o consumo relativo de água foi classificado como médio e baixo risco, já no cenário de sequeiro simulado a classificação foi de alto risco. Aponta-se que na área 1, mesmo com irrigação de 250 mm o índice apontou médio risco durante o período crítico, este fato se deve a ocorrência de um período de sete dias no início do período reprodutivo em que o ARM ficou abaixo do recomendado para a cultura, ou seja, provocando um estresse hídrico à cultura no período mais sensível. Esse período de estresse ocorreu porque o produtor optou por não utilizar a irrigação e aguardar uma precipitação prevista, fato que aconteceu em volume menor e alguns dias após a previsão.

Na figura 8, está o balanço hídrico do solo para as três áreas cultivadas com soja em sulco-camalhão, representando o déficit e excedente durante o ano-safra 2019/20.

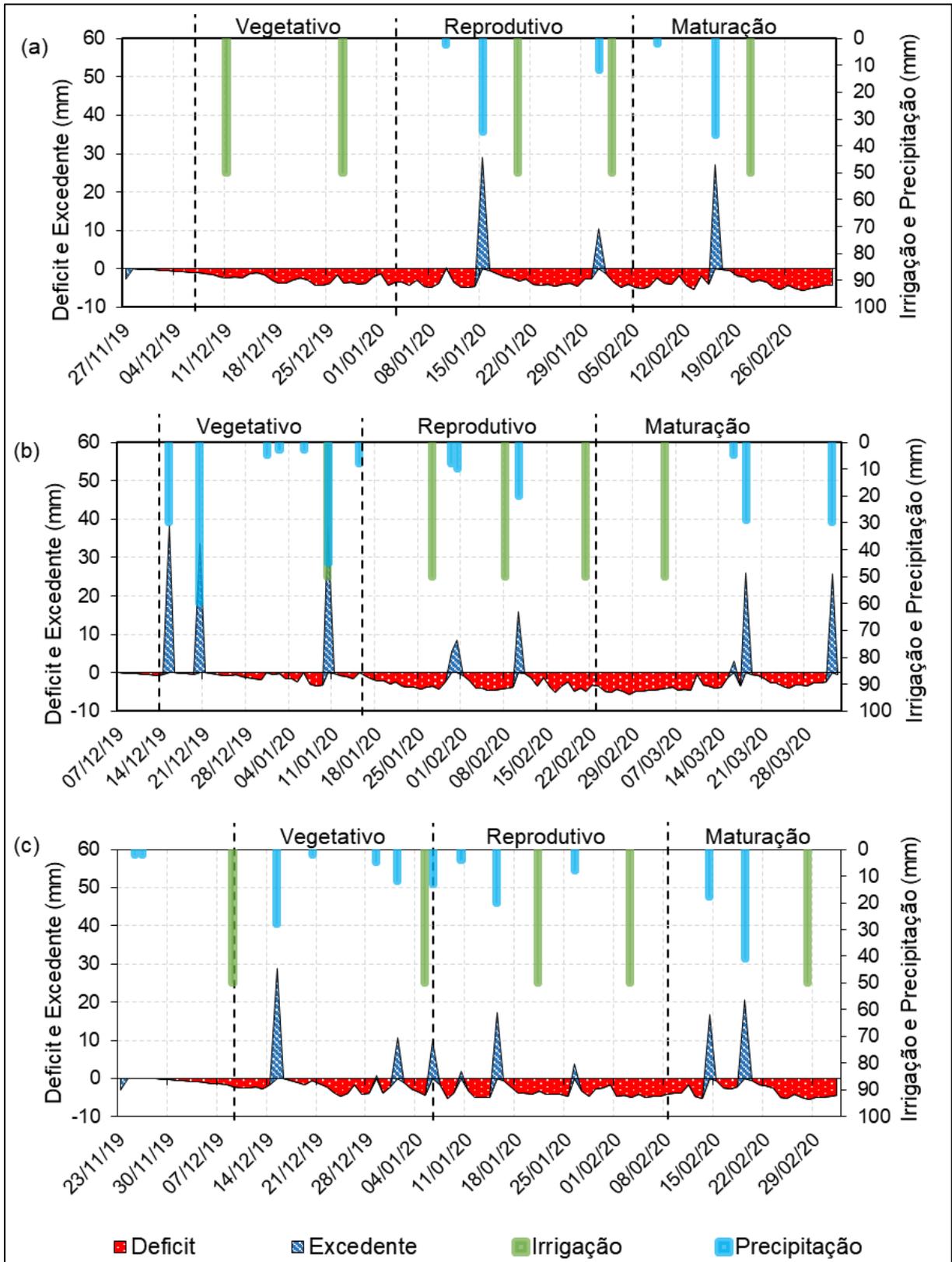


Figura 8 - Balanço hídrico do solo com o déficit e excedente durante a safra 2019/20 (a) soja- área 1; (b) soja - área 2 e (c) soja - área 3.

É possível observar na figura 9, que nas áreas de sequeiro simulado, o estado de déficit hídrico é praticamente constante ao longo do ciclo, justificando o uso médio de irrigação de 250 mm. Na área 2, 17,6 e 19,1% da precipitação foram perdidos por escoamento, na área irrigada e de sequeiro simulado, respectivamente, essa maior perda ocorreu em dois momentos: o primeiro no início do ciclo, onde dois eventos de precipitação ocorridos em uma única semana, totalizaram 90 mm (figura 8b), valor quase o dobro da capacidade de armazenamento do solo; o segundo ocorreu devido ao produtor ter aguardado a precipitação prevista para a região e não ter iniciado a irrigação no dia alertado, porém, no dia que foi realizada a irrigação foi registrada a precipitação de 45 mm, fazendo com que cerca de 80% dessa precipitação tenha se perdido por escoamento, uma vez que o solo já havia atingido a sua capacidade máxima de armazenamento de água no solo.

Esses resultados estão de acordo com o encontrado na literatura, segundo Hawkins; Hjelmfelt; Zevenbergen (1985), o escoamento superficial é influenciado pelas precipitações e suas distribuições, bem como a umidade do solo no momento da precipitação, além de depender das características do solo, como relevo, granulometria, porosidade e cobertura (SPOHR *et al.*, 2009).

#### 4.2 Balanço hídrico do ano-safra 2020/21

Os componentes do balanço hídrico, do ano-safra 2020/21, estão apresentados na tabela 13.

Tabela 13 - Componentes do balanço hídrico referentes a campos de soja e milho de sequeiro irrigados e simulados cultivados em sulco-sulco nas áreas de estudo na safra 2020/21.

	Área	Cultura	P	Acumulado (mm)			ET <sub>c</sub>	ET <sub>r</sub> /ET <sub>c</sub>	Risco
				P <sub>ef</sub>	P <sub>es</sub>	I			
Irrigada	1	Soja	514,4	378,9	135,4	50	443,00	0,50	Médio
Sequeiro simulado				379,2	135,2	0		0,47	Médio
Irrigada	2	Soja	574,0	441,7	132,3	50	377,23	0,84	Baixo
Sequeiro simulado				441,7	132,3	0		0,84	Baixo
Irrigada	4	Soja	572,7	376,1	196,6	200	441,04	0,77	Baixo
Sequeiro simulado				392,2	180,5	0		0,40	Médio
Irrigada	5	Soja	466,3	352,0	114,3	100	427,25	0,51	Médio
Sequeiro simulado				352,0	114,3	0		0,45	Médio
Irrigada	6	Soja	441,3	320,1	121,2	150	404,74	0,72	Baixo
Sequeiro simulado				327,8	113,5	0		0,53	Médio
Irrigada	7	Milho	724,1	444,6	279,5	150	490,50	0,79	Baixo
Sequeiro simulado				446,1	278,0	0		0,66	Médio

P: precipitação; P<sub>ef</sub>: precipitação efetiva; P<sub>es</sub>: escoamento superficial; I: irrigação; ET<sub>c</sub>: evapotranspiração da cultura; ET<sub>r</sub>/ET<sub>c</sub>: índice de consumo relativo de água e sua classificação de risco.

Observa-se que a precipitação bruta acumulada foi maior do que a  $ET_c$  acumulada em todas as áreas, o que em primeiro momento, pode sugerir que a demanda da cultura foi suprida somente com a precipitação, porém devido à distribuição das precipitações, aproximadamente 70% do total de precipitação acumulada do ciclo ocorreu em um curto período, concentrado em janeiro de 2021, fez-se necessária a irrigação para suprir a demanda da cultura e evitar o déficit hídrico na fase reprodutiva. A distribuição da precipitação refletiu também em maiores perdas de água precipitada por escoamento superficial. Em média, 26,2% da precipitação foi perdida nas áreas de sequeiro simulado e 27,1% nas áreas irrigadas.

Verifica-se que as áreas com cultivo de soja no cenário real (irrigado) apresentaram consumo relativo de água durante o período crítico classificado como médio e baixo risco, já no cenário de sequeiro simulado a classificação variou entre médio risco (áreas 1, 4, e 6 –  $ET_r/ET_c$  0,4 a 0,6) e baixo risco (Área 2 –  $ET_r/ET_c > 0,6$ ). Para a área 7, com cultivo de milho o cenário irrigado foi classificado como baixo ( $ET_r/ET_c > 0,7$ ) e no cenário de sequeiro simulado classificado com médio ( $ET_r/ET_c$  0,5 a 0,7).

Na figura 9 estão os BHs referente às áreas 1, 2 e 4 e na figura 10 os BHs referente às áreas 5, 6 e 7, representando o déficit e excedente durante o ano-safra 2020/21.

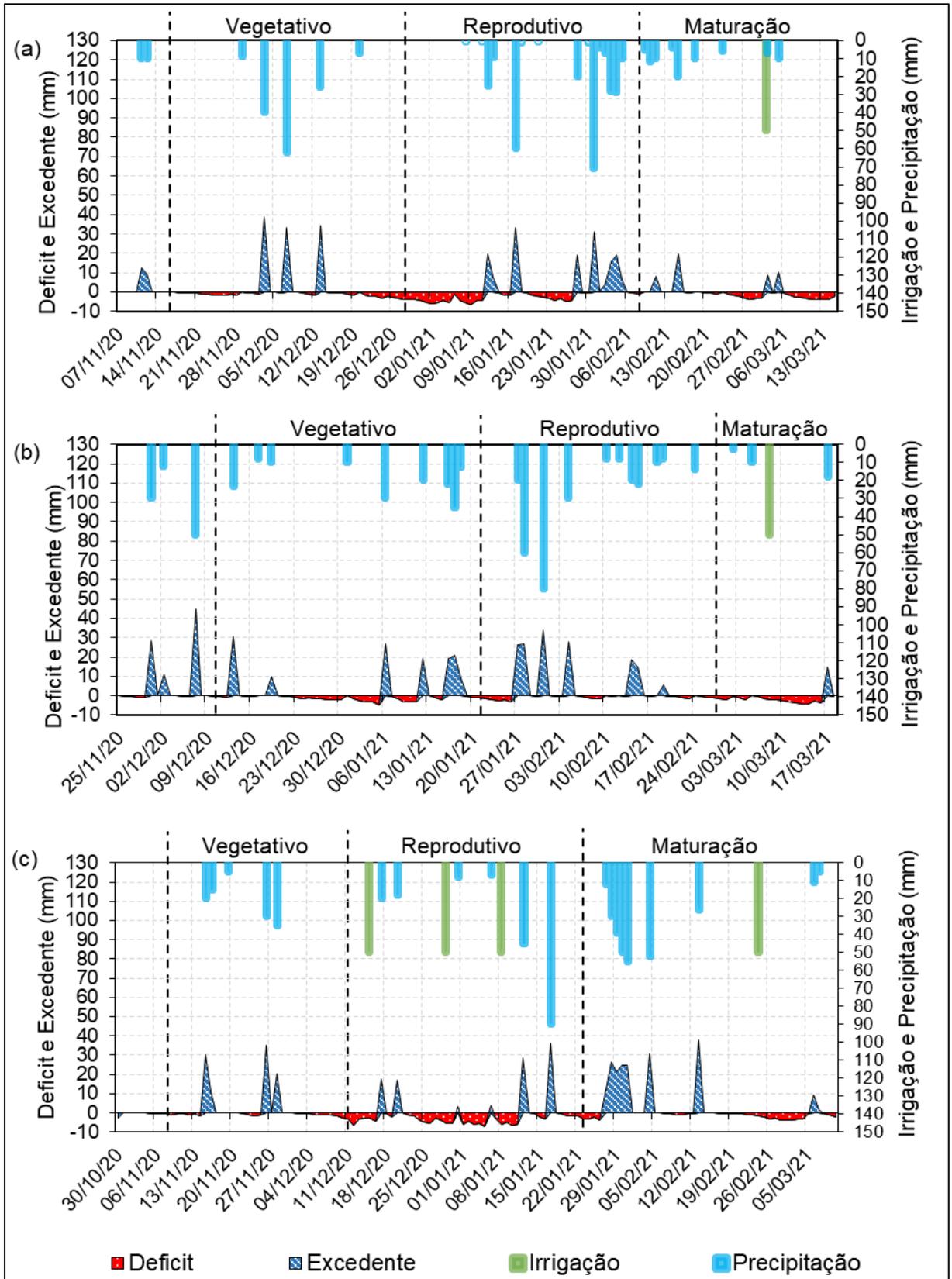


Figura 9 - Balanço hídrico do solo com déficit e excedente durante a safra 2020/21 (a) soja - área 1; b) Soja - área 2 e (c) Soja - área 4.

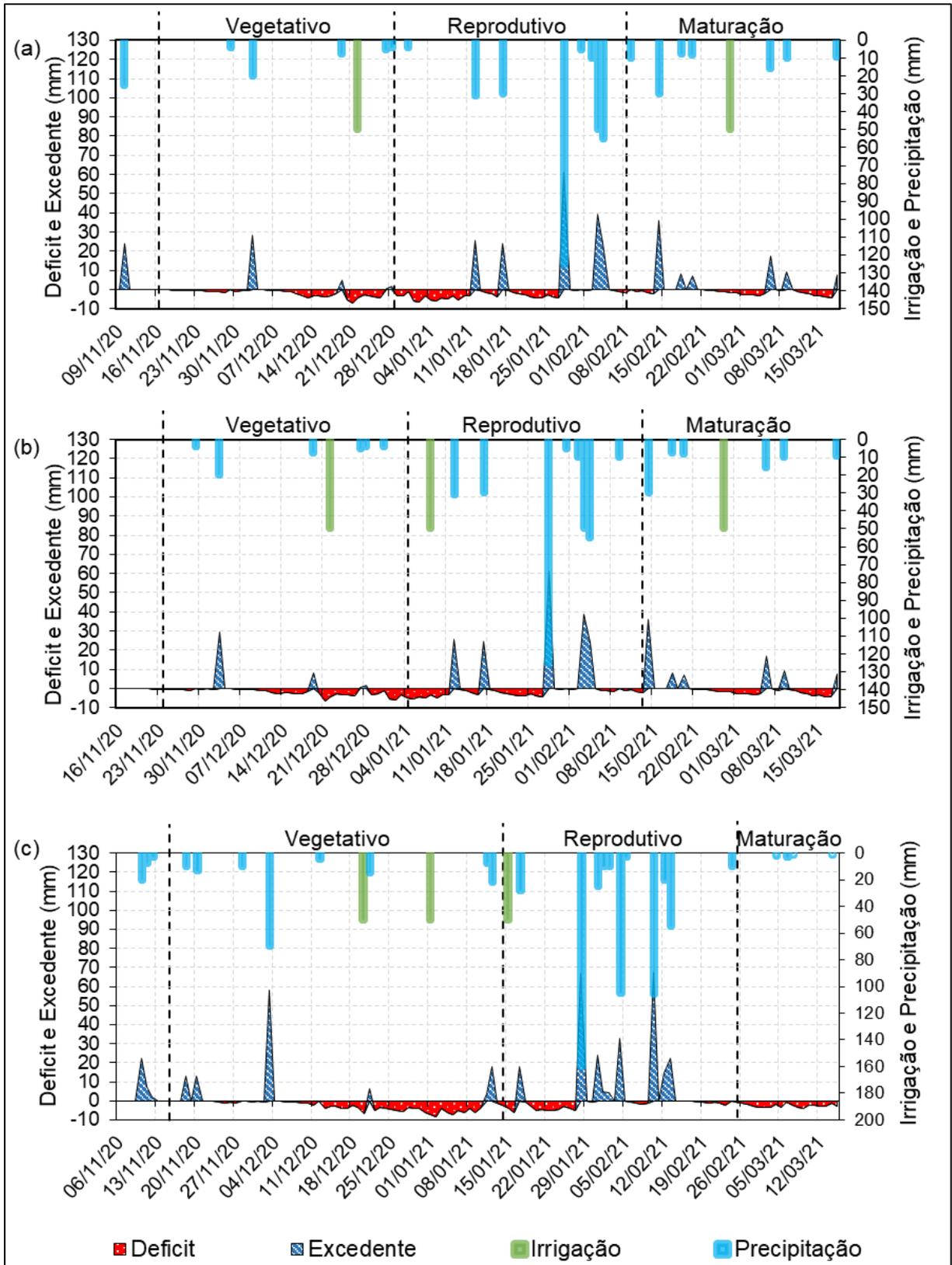


Figura 10 - Balanço hídrico do solo com o déficit e excedente durante a safra 2020/21, (a) soja- área 5; (b) soja - área 6 e (c) milho – área 4.

Nota-se que os períodos que ocorreram déficit hídrico foram precedidos por uma precipitação indicando que o produtor não irrigou baseado na previsão de

precipitação para os dias seguintes, todavia, não é recomendado aguardar por muitos dias a fim de evitar o estresse hídrico prolongado à planta. Porém, essa orientação não foi seguida na área 1 (figura 9a), onde um alerta de irrigação não foi atendido pelo produtor no início da fase reprodutiva, o que resultou em um período de 16 dias consecutivos de déficit hídrico, resultando no consumo relativo de água classificado como médio risco mesmo no cenário irrigado, de forma similar aconteceu na área 5, onde o período reprodutivo iniciou em déficit hídrico e em abas áreas isso refletiu nos índices  $ET_r/ET_c$  classificados como médio risco.

Observa-se ainda que as áreas 1 e 2 (figuras 9a e 9b) apresentaram condições de precipitação favoráveis durante quase todo o ciclo da soja (com exceção da irrigação na área 1 não atendida), ocorrendo deficiência hídrica no final do ciclo, amenizada por uma irrigação.

### 4.3 Balanço hídrico do ano-safra 2021/22

Os componentes do balanço hídrico, do ano-safra 2020/21, estão apresentados na tabela 14.

Tabela 14 - Componentes do balanço hídrico referentes a lavouras de soja e milho de sequeiro irrigado e simulado cultivadas em sulco-sulco nas áreas de estudo na safra 2021/22.

	Área	Cultura	Acumulado (mm)				$ET_c$	$ET_r/ET_c$	Risco
			P	$P_{ef}$	$P_{es}$	I			
Irigada	1	Soja	362,0	307,2	54,8	150	461,7	0,70	Baixo
Sequeiro simulado			310,6	51,4	0	0	0,54	Médio	
Irigada	4	Soja	331,0	262,9	68,1	300	519,7	0,76	Baixo
Sequeiro simulado			277,1	53,9	0	0	0,42	Médio	
Irigada	7	Milho	300,0	263,2	36,8	150	460,3	0,52	Médio
Sequeiro simulado			273,1	26,9	0	0	0,31	Alto	
Irigada	8	Milho	176,0	156,5	19,5	400	588,8	0,62	Médio
Sequeiro simulado			167,4	8,6	0	0	0,14	Alto	
Irigada	9	Milho	548,0	388,8	159,2	250	709,9	0,56	Médio
Sequeiro simulado			398,6	149,4	0	0	0,20	Alto	

P: precipitação;  $P_{ef}$ : precipitação efetiva;  $P_{es}$ : escoamento superficial; I: irrigação;  $ET_c$ : evapotranspiração da cultura;  $ET_r/ET_c$  índice de consumo relativo de água e sua classificação de risco.

No ano-safra 2021/22 foi registrado uma média de 336,2 mm de precipitação e a maior média de  $ET_c$  (527 mm), onde a  $ET_c$  acumulada foi maior do que precipitação acumulada em todas as áreas. As precipitações na área 8, representaram cerca de somente 27% da demanda total da cultura, as demais áreas variaram de 50,6 a 66,5% nas áreas 4 e 1, respectivamente, ressaltando a importância da irrigação para as culturas de sequeiro em terras baixas.

Foram registrados nesta safra os maiores picos de  $ET_o$ , o que refletiu nos maiores valores de estimativa de  $ET_c$ , com registros de  $11,53 \text{ mm dia}^{-1}$  para a soja na área 4 e  $12,51 \text{ mm dia}^{-1}$  para o milho na área 8. Além dos picos, ocorridos entre dezembro e fevereiro, foi observado um aumento das médias diárias de  $ET_c$  em relação ao ano anterior,  $3,5$  e  $4,2 \text{ mm dia}^{-1}$ , para a soja e milho, respectivamente, acentuados principalmente nos períodos críticos para a cultura da soja e milho.

As maiores médias de  $ET_c$  estão associadas às condições do fenômeno La Niña que ocorreu no período, conforme apontado no boletim nº 60 (COPAAERGS, 2022), e concordam com Boeira *et al.* (2020), que em estudo realizado na região Sudeste do Rio Grande do Sul, afirma que a La Niña exerce influência positiva significativa na  $ET_o$  o que conseqüentemente influencia o aumento da  $ET_c$ .

Cordeiro; Berlato; Alves (2018), em estudo realizado no Rio Grande do Sul, para os meses entre novembro a março no período de 1971-2009, concluíram que na metade Sul do estado, a La Niña, provoca baixos índices pluviométricos, principalmente em dezembro e janeiro, concordando com os registros do presente estudo no ano-safra 2021/22, em que a  $ET_c$  nesse período representou de 65 a 82% do total requerido durante o ciclo, para as áreas 1 e 7, respectivamente, porém as precipitações corresponderam a 50% em média da  $ET_c$  no mesmo período, justificando assim frequente irrigação nesse período, a fim de evitar o déficit hídrico às culturas.

Verifica-se nas áreas 1 e 4 com cultivo de soja, no cenário real (irrigado) apresentaram consumo relativo de água durante o período crítico classificado como baixo risco ( $ET_r/ET_c > 0,6$ ), já no cenário de sequeiro simulado a classificação foi de médio risco ( $ET_r/ET_c$  de 0,4 a 0,6). Para as áreas 7, 8 e 9, com cultivo de milho o cenário irrigado foi classificado como médio risco ( $ET_r/ET_c$  de 0,5 a 0,7) e no cenário de sequeiro simulado classificado com alto risco ( $ET_r/ET_c < 0,5$ ).

Na figura 11 estão os BHs referente às áreas 1, 4 e 7 e na figura 12 os BHs referente às áreas 8 e 9, representando o déficit e excedente durante a safra 2020/21.

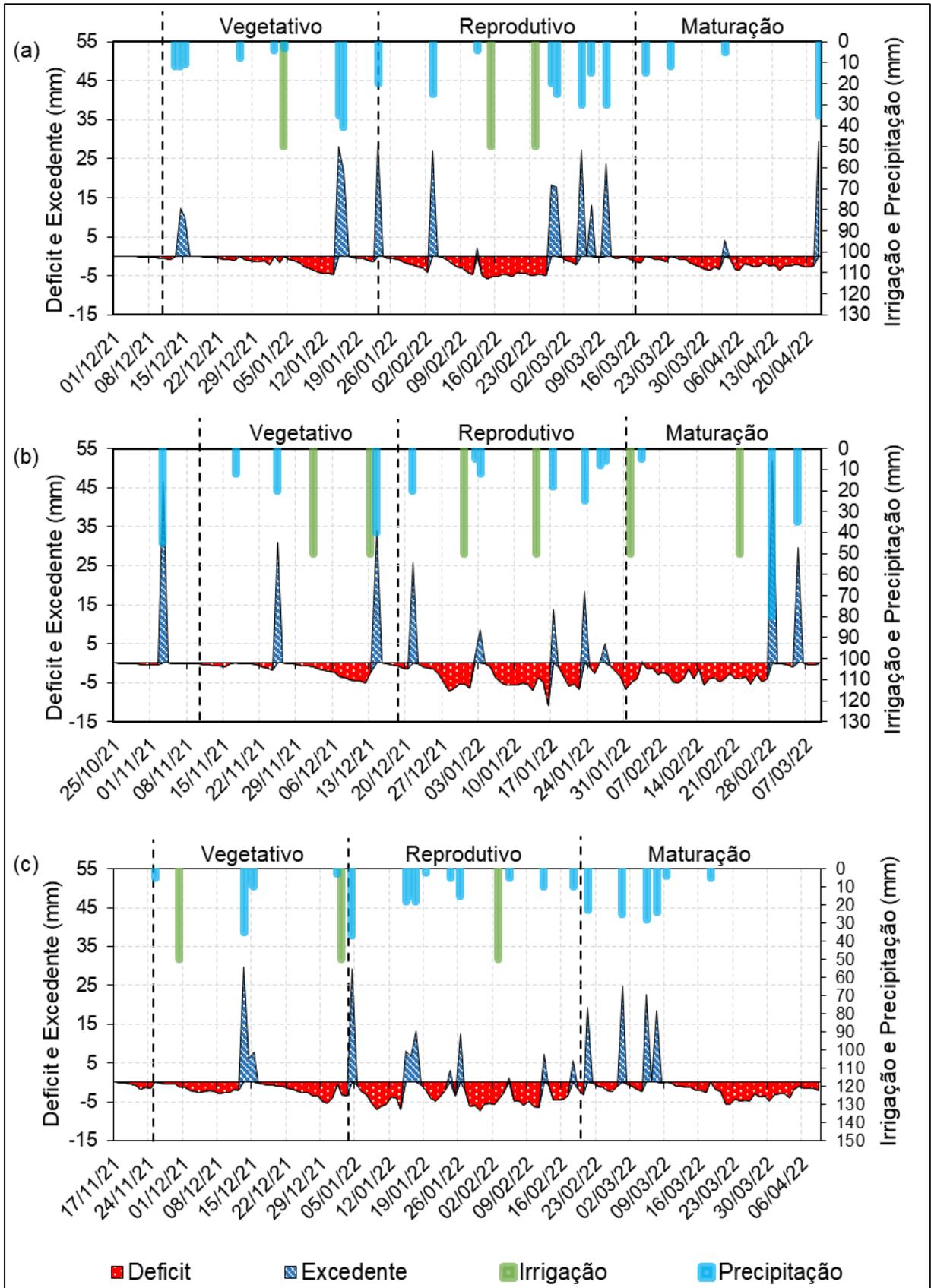


Figura 11 - Balanço hídrico do solo com déficit e excedente durante a safra 2021/22 (a) soja - área 1; b) Soja - área 4 e (c) Milho - área 7.

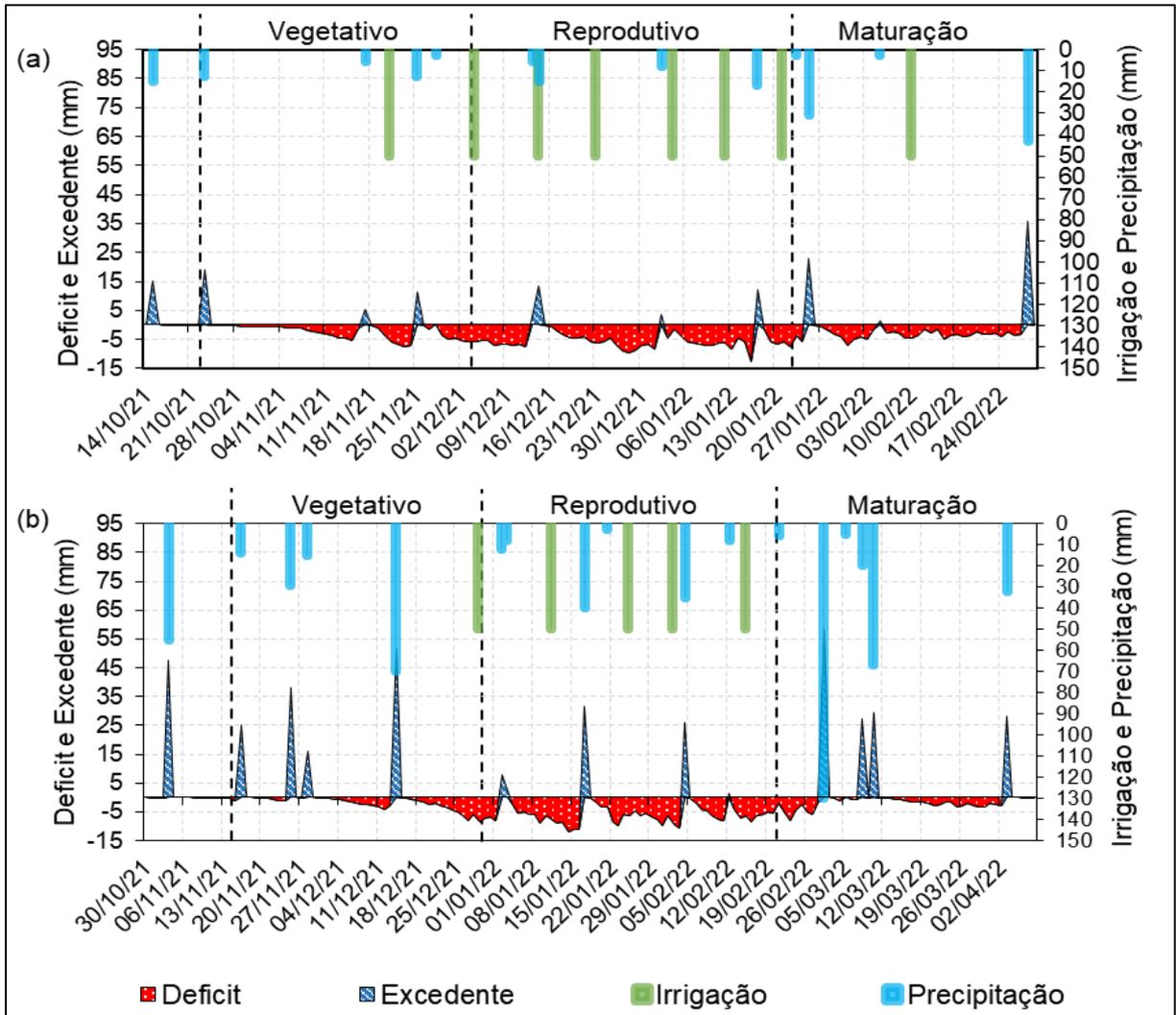


Figura 12 - Balanço hídrico do solo com déficit e excedente durante a safra 2021/22 (a) milho - área 8 e (b) milho - área 9.

Observa-se no ano-safra 2021/22, principalmente nas áreas 8 e 9 com o cultivo de milho, as frequentes irrigações ocorridas no período de dezembro a fevereiro, coincidindo com os picos de  $ET_c$  e baixos registros pluviométricos. Note que sem as irrigações realizadas, as culturas estariam sob condição de déficit hídrico praticamente em todo o período reprodutivo.

#### 4.4 Resumo dos balanços hídricos para os três anos de safra

Ao avaliar os dados das três safras, descritos nas tabelas 11, 12 e 13 nota-se a irregularidade em relação a distribuição de chuvas no período dos cultivos de verão. Essas irregularidades são desencadeadas por períodos de baixa e de alta pluviosidade. A deficiência hídrica variou de 63,8 mm na área 1 em 2020/21 a 421,3 mm na área 8 em 2021/22, sendo determinante o efeito positivo da irrigação através

do sistema sulco-camalhão sobre as produtividades de grãos observadas nas áreas abrangidas por este estudo. Observa-se também que, mesmo no ano-safra 2020/21 em que as precipitações foram abundantes, porém distribuídas irregularmente, as culturas necessitaram de irrigação no início ou no fim da fase reprodutiva, a fim de evitar o déficit hídrico nos períodos mais sensíveis das culturas e conseqüentemente para evitar a redução na produtividade das culturas.

Sobre as estimativas do escoamento superficial, nota-se que foi maior nas áreas que apresentaram maior precipitação, sendo os maiores valores estimados de escoamento para a área 7, ano-safra 2020/21 com milho, tanto na área irrigada quanto no sequeiro simulado, com 278,5 mm, para uma precipitação de 724,1 mm, o que pode ser atribuído às intensidades das precipitações (não analisadas neste estudo) ou a maior umidade do solo nas áreas irrigadas, favorecendo as perdas por escoamento (OLIVEIRA, *et al.*, 2013; SPOHR *et al.*, 2009).

Observou-se também que, embora tenha se registrado maior média de  $ET_c$  na safra 2021/22, a média diária de  $ET_c$  para a soja ao longo dos ciclos mostrou pouca variação, de 3,3 mm dia<sup>-1</sup> em 2020/21 a 3,52 mm dia<sup>-1</sup> em 2021/22. Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira *et al.* (2016), que obtiveram um consumo médio de  $ET_c$  de 3,3 mm dia<sup>-1</sup> em Cruz Alta/RS. Para o milho, observou-se uma média de consumo diário de 4,0 mm, o que está de acordo com resultados encontrados por Ávila *et al.* (2017), que obtiveram uma média de 3,86 mm dia<sup>-1</sup> de  $ET_c$  ao simularem a variação da água disponível no solo em Santa Maria na safra 2011/12.

Os maiores valores de  $ET_c$  refletiram em menores valores do índice  $ET_r/ET_c$ , mesmo nas áreas irrigadas. Nos anos de menores registros pluviométricos (2019/20 e 2021/22), o  $ET_r/ET_c$  nas áreas de sequeiro simulado variou de 0,19 a 0,54, resultando numa classificação de alto e médio risco e médio a soja. Para o milho variou de 0,2 a 0,31, resultando numa classificação de alto risco, o que reforça a importância da irrigação para a estabilidade produtiva das culturas de sequeiro em terras baixas, principalmente para a cultura do milho. De acordo com Berlato (1987), em estudo onde foram ajustados modelos agrometeorológicos de previsão de rendimento, o autor associou esse alto risco a reduções de mais de 70% do rendimento de grãos da cultura a soja. Franchini *et al.* (2012), ao associarem a relação do índice ( $ET_r/ET_c$ ) ao rendimento das culturas de soja, em diferentes sistemas de preparo do solo em um experimento de 23 anos no Sul do país, observaram que no

sistema de preparo convencional o rendimento máximo da soja foi de (3429 kg ha<sup>-1</sup>) para índice acima de 0,8 e rendimento mínimo de (1471 kg ha<sup>-1</sup>) para índice de 0,53.

Bergamaschi *et al.* (2006), ao avaliarem o impacto do déficit hídrico no rendimento de grãos de milho e a eficácia da irrigação no florescimento, concluíram que o índice  $ET_r/ET_c$  explicou quase 80% das variações no rendimento de grãos, estabilizando quando o índice ficou acima de 0,7.

Com base nos resultados das três safras, observa-se que o volume médio de irrigação para a soja e milho no sistema sulco-camalhão foi de 1750 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e 2375 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Comparado ao volume médio de 9 mil m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> empregado na cultura do arroz irrigado por inundação no RS (SOSBAI, 2018), obtém-se a seguinte razão: cada hectare de arroz irrigado por inundação é possível irrigar 5,1 hectares de soja ou 3,8 hectares de milho no sistema sulco-camalhão. Demonstrando que a tecnologia sulco-camalhão pode ser potencial estratégia de rotação para orizicultores, em especial para aqueles localizados em áreas com menor disponibilidade hídrica.

#### 4.5 Produtividade da água (WP)

A Tabela 15 mostra os resultados da produtividade da água ( $WP_{Total}$  e  $WP_{Irrig}$ ) e as produtividades médias de grãos cultivados em sulco-camalhão das culturas de soja nas áreas irrigadas e não irrigadas e de milho em áreas irrigadas, durante as safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22.

Tabela 15 - Produtividade média da soja irrigada e milho irrigados e produtividade média da soja nas áreas de referência cultivados em sulco-camalhão, durante as safras 2019/2020, 2020/21 e 2021/22

Ano safra	Área	Cultura	Irigado			Não irrigado	
			Produtividade kg ha <sup>-1</sup>	$WP_{Total}$ kg m <sup>-3</sup>	$WP_{Irrig}$ kg m <sup>-3</sup>	Produtividade kg ha <sup>-1</sup>	$WP_{Total}$ kg m <sup>-3</sup>
2019/20	1	Soja	3840,0	1,02	1,54	1200,0	0,93
	2	Soja	3060,0	0,63	1,22	1920,0	0,81
	3	Soja	4956,0	1,20	1,98	3720,0	1,97
2020/21	1	Soja	5058,0	1,09	10,12	3642,0	0,85
	2	Soja	5634,0	1,21	11,27	4230,0	0,97
	4	Soja	6348,0	1,05	3,17	4200,0	0,95
	5	Soja	3966,0	0,83	3,97	2580,0	0,65
	6	Soja	3966,0	0,79	2,64	2580,0	0,70
2021/22	7	Milho	9360,0	1,34	6,24	--	--
	1	Soja	4200,0	0,88	2,80	3480,0	1,06
	4	Soja	5058,0	0,88	1,69	1440,0	0,50
	7	Milho	10335,6	2,40	6,89	--	--
	8	Milho	7560,7	1,31	1,89	--	--
	9	Milho	6654,0	1,01	2,66	--	--

Os resultados da  $WP_{Total}$  para os três anos avaliados nas áreas irrigadas, apresentaram valores de 0,63 a 1,21 kg m<sup>-3</sup> para a soja e de 1,01 a 2,40 kg m<sup>-3</sup> para

o milho, ou seja, para a soja, a cada 1 mm de água consumida entre precipitação e irrigação, produziu de 6,3 a 12,1 kg por hectare de grãos de soja e de 10,1 a 24 kg por hectare de grãos de milho. Nos de soja não irrigados variou de 0,5 a 1,97 kg m<sup>-3</sup>.

A menor WP<sub>Total</sub> da soja irrigada, ocorreu na área 2 na safra 2019/20 (0,63 kg m<sup>-3</sup>). Esse resultado ocorre devido o consumo de água somando a precipitação e a irrigação, ser estimada considerando a homogeneidade no estabelecimento da lavoura, no entanto devido à baixa uniformidade da germinação nesta área obteve-se a menor produtividade de grãos (3060 kg ha<sup>-1</sup>). Estes resultados ressaltam a importância de se conhecer os outros fatores que podem interferir na produtividade da cultura (desenvolvimento adequado, sanidade vegetal, nutrição mineral apropriada, etc.) para que utilização do índice WP seja correta, uma vez garantida que não houve interferência de outros parâmetros na produtividade o índice é eficiente.

Quando comparado a WP<sub>Total</sub> da soja irrigada e a da soja não irrigada, percebe-se que em geral, a WP<sub>Total</sub> nas áreas não irrigadas tende a ser menor que nos irrigados, devido às maiores diferenças de produtividades de grãos, apontando-se exceção nas áreas 2 e 3 do ano-safra 2019/20, que devido a menor diferença de produtividade entre as áreas, apresentaram WP<sub>Total</sub> de 0,63 e 1,20 kg m<sup>-3</sup> no irrigado e 0,81 e 1,97 kg m<sup>-3</sup> no não irrigado, respectivamente.

A maior WP<sub>Total</sub> 2,40 kg m<sup>-3</sup> foi obtida na safra 2021/22 para o milho irrigado, na área 7. Essa maior WP<sub>Total</sub> em 2021/22 ocorreu devido ao menor volume de precipitação para uma produtividade maior. Em contrapartida, na mesma área 7, a produtividade da água baseada na lâmina de irrigação WP<sub>Irrig</sub>, foi semelhante em ambas as safras (6,24 e 6,89 kg m<sup>-3</sup>), para cada 1 mm de irrigação produziu 62,4 e 68,8 kg por hectare de grãos de milho nas safras 2021/22 e 2021/22, respectivamente.

Essa menor diferença ocorre devido a WP<sub>Irrig</sub> levar em conta apenas a água utilizada pela irrigação, e neste caso, nas duas safras o volume irrigado foi o mesmo, porém, com produtividades diferentes. Estes resultados reforçam a importância da irrigação para suprir a demanda da cultura nos momentos críticos e corroboram com os encontrados por Rodrigues *et al.* (2013), que em estudos com irrigação para o cultivo de milho no município de Santa Maria/RS, obtiveram médias de WP<sub>Total</sub> = 1,74 e WP<sub>Irrig</sub> = 5,73 kg m<sup>-3</sup>, referente a uma produtividade média de 12590,3 kg ha<sup>-1</sup>.

Camilo *et al.* (2019), ao quantificarem a produtividade da água em diferentes sistemas agrícolas para a cultura do milho irrigado por pivô central, em dois anos-safras, observaram que ao reduzirem em 56% o uso da água houve a redução de 15%

na produtividade, obtendo os índices de  $WP_{Total}$  e  $WP_{Irrig}$  (1,48 e 1,94  $kg\ m^{-3}$ ), referente a uma produtividade média de 9544,7  $kg\ ha^{-1}$ , no primeiro ano com uma lâmina média de irrigação de 429 mm e ao reduzirem a irrigação para 117 mm, produziram em média 8061,7  $kg\ ha^{-1}$ , incrementando os índices  $WP_{Total}$  e  $WP_{Irrig}$  (2,86 e 6,0  $kg\ m^{-3}$ ).

Diferente de outros índices, não existe um valor referência considerado ideal para os indicadores de produtividade da água. No entanto, no entanto, uma variedade de cultura que possua o mesmo potencial produtivo que outra, submetidas aos mesmos manejos, porém expresse maior  $WP_{Total}$  e  $WP_{Irrig}$ , indica que tal variedade tem potencial de usar menos água do que a segunda. Assim, com base nos resultados médios obtidos ( $WP_{Total}$ ), observa-se que a cultura mais eficiente em termos de produtividade da água foi o milho, onde a cada 1 mm de água consumida entre precipitação e irrigação, produziu em média 15,1 kg por hectare de grãos já para a soja a cada 1 mm, produziu em média 9,6 kg por hectare de grãos.

De acordo com a lógica matemática, considerando um cenário ideal, os índices  $WP_{Total}$  e  $WP_{Irrig}$  terão seus valores maximizados quando a produtividade atingida for a máxima potencial e as precipitações iguais a demanda hídrica da cultura, distribuídas uniformemente ao longo do ciclo, de modo que não ocorra escoamento superficial em nenhum evento. Seguindo essa lógica, aponta-se na tabela 16 a classificação do índice produtividade da água  $WP_{Total}$  ( $kg\ m^{-3}$ ) para as culturas de soja e milho cultivados em sulco camalhão em terras baixas.

Tabela 16 – Classificação do índice produtividade da água  $WP_{Total}$  ( $kg\ m^{-3}$ ) para as culturas de soja e milho cultivados em sulco camalhão em terras baixas.

Classificação	$WP_{Total}$ ( $kg\ m^{-3}$ )	
	Soja	Milho
Ótimo	> 1,4	> 2,2
Bom	1,1 a 1,4	1,2 a 2,2
Ruim	< 1,1	< 1,2

Portanto, discutir como melhorar os índices  $WP_{Total}$  e  $WP_{Irrig}$  visando a economia de água na irrigação requer a consideração da contribuição das precipitações para satisfazer as necessidades da cultura, e a adoção de melhores práticas agronômicas associada às adaptações de cultivares ao ambiente de interesse que visem melhores produtividades.

Sobre a produtividade da soja, observa-se maiores produtividades nas áreas irrigadas em relação às de referência, com incrementos variando de 33,2% a 251%.

Aponta-se que a diferença de 220% ocorreu na área 1 da safra 2019/20, onde foi registrado a menor precipitação acumulada com produtividade de 3840 kg ha<sup>-1</sup> na área irrigada, em contraste a 1200 kg ha<sup>-1</sup> na área sem irrigação, já o incremento de 251,3% na área 4 da safra 2021/22, se deu em função da alta demanda evapotranspirativa e dos baixos registros pluviométricos no período de maior sensibilidade da cultura.

Na safra 2020/21, apesar de apresentar condições de precipitação favoráveis durante quase todo o ciclo da soja, foi notado na área 1 que mesmo passando por um período de déficit hídrico e recebido somente uma irrigação no final do ciclo, a produtividade da área irrigada (5058 kg ha<sup>-1</sup>) apresentou produtividade de grãos 38,9% superior à área de referência (3642 kg ha<sup>-1</sup>).

Contudo, o rendimento médio de soja obtido nas áreas de sequeiro simulado na safra 2019/20 (2280 kg ha<sup>-1</sup>), foi 17,6% acima da produtividade média de grãos de soja observada no Estado do RS no mesmo período (1939 kg ha<sup>-1</sup>), quando comparado a média do estado à média das áreas irrigadas (3952 kg ha<sup>-1</sup>) a diferença é de 103,8% (CONAB, 2020). Segundo o mesmo levantamento, essa baixa média de produtividade se deu em função de problemas climáticos na Região Sul que prejudicaram o potencial produtivo das lavouras, sobretudo as do Rio Grande do Sul (RS), reduzindo inclusive a produtividade média do país em 3%, comparada à safra anterior. Foram reportados dados de produtividade de até 6715,8 kg ha<sup>-1</sup> na região das Missões, na mesma safra em competição entre produtores de soja na categoria irrigada (CESB, 2020).

Na safra 2020/21, a produtividade média de soja obtida entre as áreas irrigadas do estudo (4994,4 kg ha<sup>-1</sup>) foi de 45,5% acima da média da produtividade de soja no estado (3433 kg ha<sup>-1</sup>) (CONAB, 2021). Ressalta-se também que, neste ano-safra, foi registrado o maior potencial de produtividade de soja em sulco-camalhão, obtido na área 4 (6348,0 kg ha<sup>-1</sup>), ou seja, 84,9% acima da média do RS.

Na safra 2021/22, a produtividade média de soja obtida nas áreas irrigadas do estudo (4629 kg ha<sup>-1</sup>) foi de 202% acima da média da produtividade de soja no estado (1530 kg ha<sup>-1</sup>), segundo levantamento parcial CONAB (2022), essa redução da média de produtividade em comparação ao ano anterior se deu em função da oscilação nas condições climáticas durante o ciclo da cultura, onde relata-se que nas fases iniciais de desenvolvimento, as precipitações registradas eram escassas e até postergaram as operações de semeadura em alguns casos, por falta de umidade nos solos.

Sobre a produtividade do milho, embora não tenhamos áreas não irrigadas no estudo para comparação, observa-se na safra 2020/21 que área com cultivo de milho avaliada apresentou produtividade 70,9% acima da média de produtividade no RS (5476 kg ha<sup>-1</sup>) (CONAB, 2021) e na safra 2021/22 a produtividade média entre as áreas cultivadas com milho (8183 kg ha<sup>-1</sup>) foi 125,8% em comparação a média de produtividade no RS (3624 kg ha<sup>-1</sup>), segundo levantamento parcial CONAB (2022).

Comparando os BHs das áreas de soja e milho irrigados com os respectivos déficits e excessos ocorridos nos BHs de sequeiro simulado nas mesmas áreas, mostrados no item anterior, associado aos resultados de produtividades nos três anos analisados na tabela 15, observa-se que o fator chave em relação às melhores produtividades foi a entrada da irrigação durante a fase reprodutiva da soja (início da floração ao enchimento de grãos – R1 a R8) e do milho (período reprodutivo - R1 a R4). Esta constatação concorda com Sangoi *et al.* (2010), que destacam que a deficiência hídrica é o fator ambiental que mais limita os altos rendimentos de grãos de milho no Brasil, especialmente no RS, onde, apesar de geralmente ocorrer totais acumulados de precipitação elevados durante a safra, a mesma não ocorre de forma uniforme e durante as fases fenológicas que a planta mais necessita.

Cabe ressaltar que embora a temperatura do solo não tenha sido monitorada durante os ciclos das culturas nesse estudo, a irrigação via sulco-camalhão pode reduzir estresses por temperatura. Segundo Farias *et al.* (2009), a faixa ótima de temperatura do solo para a germinação das sementes das culturas de verão, como a soja e milho, é de 20 a 30 °C. Ribas *et al.* (2015), ao quantificarem a temperatura do solo com e sem irrigação em Santa Maria/RS, concluíram que o efeito da irrigação reduziu 4,5 °C em média na temperatura do solo, os autores observaram temperaturas no solo a 0,05 m de 35-37 °C em novembro de 2011 e 40-42 °C em janeiro 2012, ou seja, acima da faixa ótima de temperatura do solo para a germinação das sementes.

## **4.6 Ajuste de parâmetros**

### **4.6.1 Sensoriamento remoto para ajuste da ET<sub>c</sub>**

#### **4.6.1.1 IVs da soja e milho nas safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22**

As Figuras 13 e 14 mostram a evolução dos IVs (NDVI, SAVI, EVI e SR) durante as safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22 e sua relação com os estádios fenológicos da soja e do milho, respectivamente.

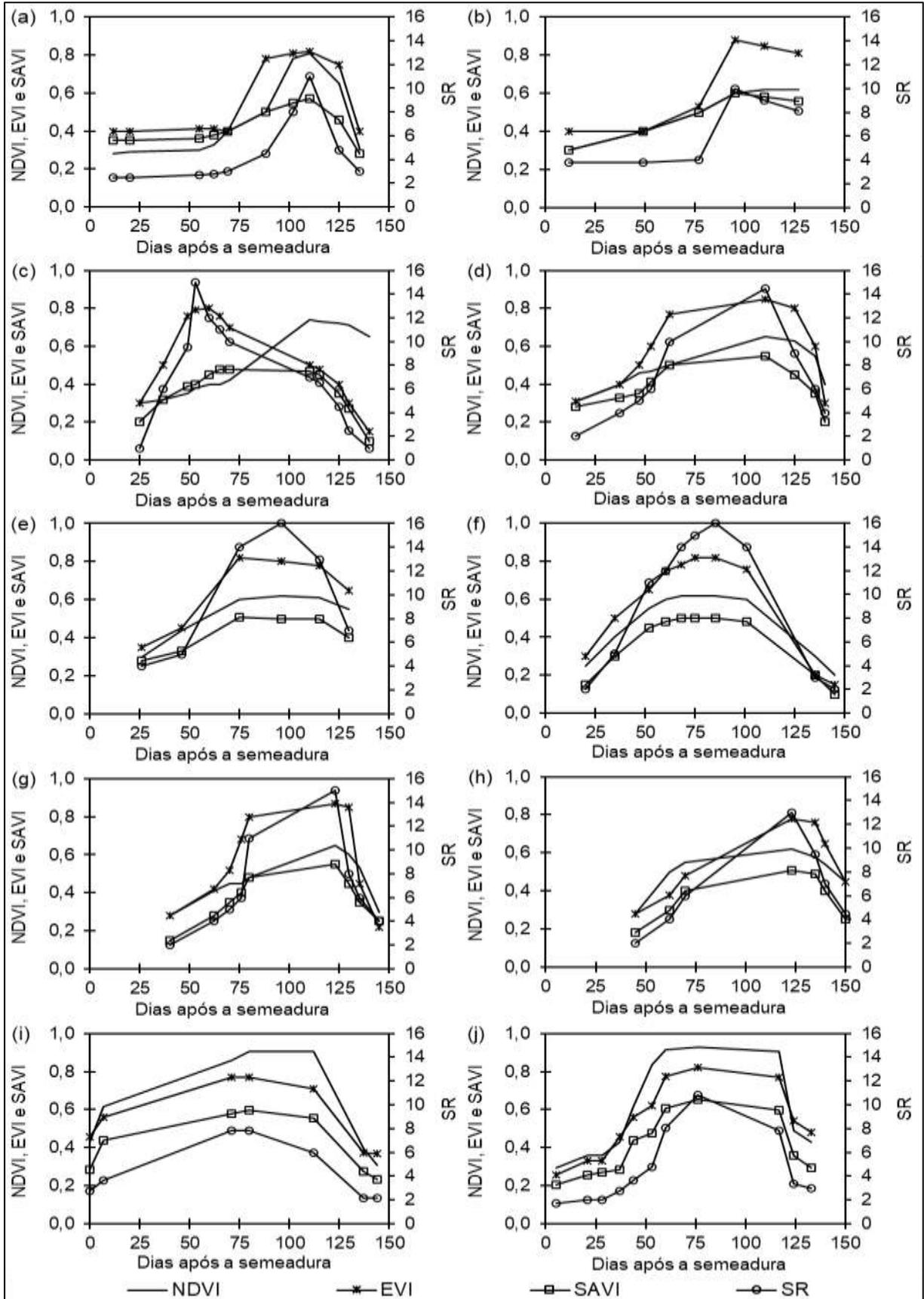


Figura 13 - Comportamento espectral de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*), SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*) e SR (*Simple Ratio*) para a cultura da soja no período 2019/20 – área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c); 2020/21 - área 1 (d), área 2 (e), área 4 (f), área 5 (g) e área 6 (h) e 2021/22 área 1 (i) e área 4 (j).

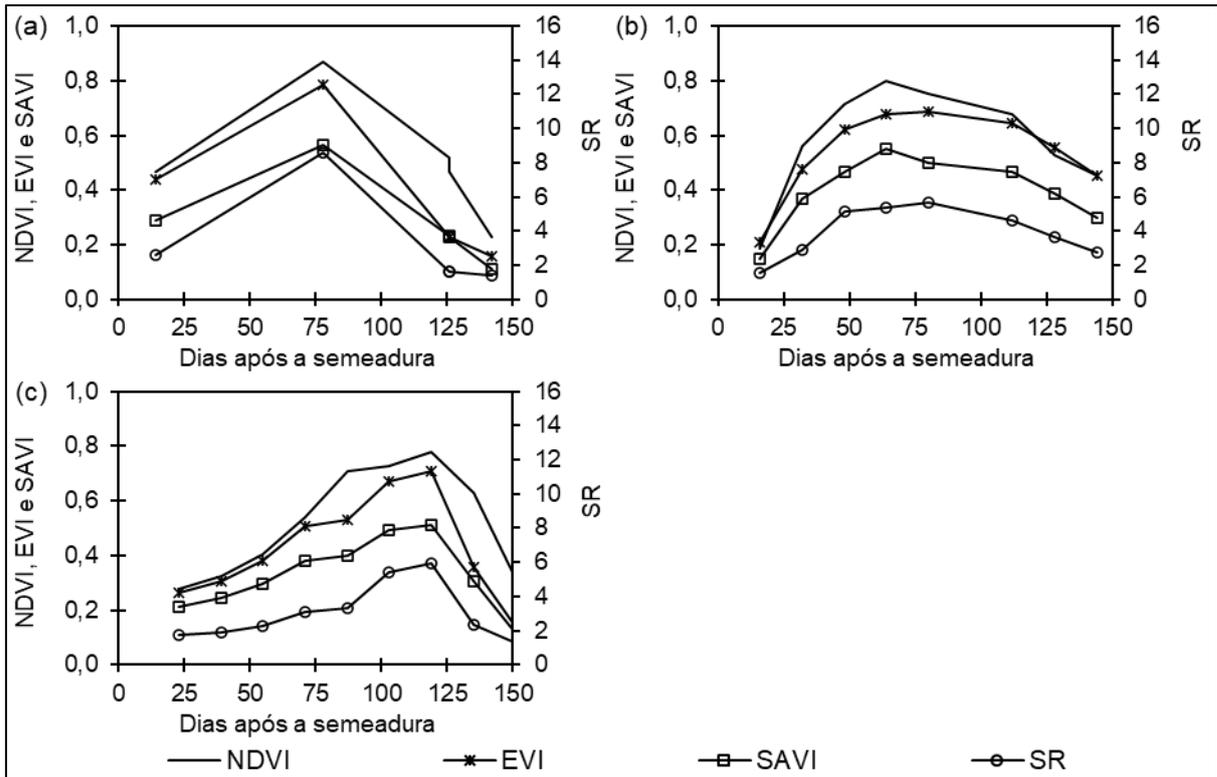


Figura 14 - Comportamento espectral de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*), SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*) e SR (*Simple Ratio*) para a cultura do milho no período 2021/22 – área 7 (a), área 8 (b) e área 9 (c).

Não foi possível a obtenção de dados de imagens livres de nuvens da área 7, safra 2020/21, portanto o comportamento espectral dos IVs deste estudo para a cultura do milho foi realizado a partir dos dados da safra 2021/22. Na área 2, safra 2019/20 (figura 13b) e na área 7, safra 2021/22 (figura 14a), o comportamento dos IVs diferem dos demais devido ao menor número de imagens sem nuvens que constituem a série temporal. Essas contatações ressaltam a limitação no uso de dados de satélite em relação a resolução temporal frente às imagens de alta resolução e múltiplas revisitações adquiridas de um drone, por exemplo, no entanto a aquisição de drones com câmeras multiespectrais ainda não é uma realidade para a maioria dos produtores, o que torna o uso de imagens de satélites a opção viável para tal fim.

Em geral, observa-se que o comportamento espectral dos IVs segue o comportamento típico observado em culturas anuais. Segundo Pinto *et al.* (2017), tais culturas demonstram três momentos bem definidos (desenvolvimento, incremento de biomassa e maturação). É possível notar tal comportamento nas figuras 14 e 15, onde baixos valores são encontrados no início dos ciclos. Posteriormente, os valores dos IVs aumentam até o estágio reprodutivo, período de maior desenvolvimento das plantas, ocorrendo em média aos 100 dias após a semeadura (DAS). Finalmente, os

IVs diminuem na fase de maturação completa, onde a senescência é expressa pela falta de fitomassa verde ao final do ciclo.

Nota-se que o SR apresenta menor sensibilidade às variações da vegetação ao longo do ciclo, não representando as adições de vegetação até V3 além de não apresentar um período de estabilidade no estágio reprodutivo quando comparado aos demais IVs (Figura 13). Por outro lado, o SR apresenta maior sensibilidade no estágio de desenvolvimento vegetativo máximo da cultura, essa característica é percebida em quase todas as áreas, onde ocorre pouca variação da SR até 75 DAS, em média 2 tanto para soja quanto para o milho e a partir disso, ocorrem “picos” variando de 8 a 16 pra soja e 4 a 8 no milho. Essa característica também é relatada em outros estudos (JENSEN & EPIPHANIO, 2009; GU *et al.*, 2013; FORMAGGIO & SANCHES, 2017; ZHU & LIU, 2015).

Os valores máximos de NDVI para o milho de 0,87, 0,80 e 0,79, para as áreas 7, 8 e 9 da safra 2021/22, respectivamente são comparáveis aos valores de NDVI relatados por Marcial-Pablo *et al.*, (2021), em estudo no México e Gitelson; Pen; Huemrich (2014), que relataram valores de NDVI variando de 0,28 para a fase vegetativa e 0,85 para a reprodutiva, utilizando imagens MODIS.

Na área 2, safra 2019/20 (figura 14b) além do menor número disponível de imagens sem nuvens para constituir a série temporal, houve a baixa uniformidade da germinação. Foram observados problemas de má regulagem da semeadora, o que favoreceu a maior exposição das entrelinhas do cultivo e conseqüentemente um baixo nível de biomassa no início do seu ciclo fenológico, acentuando a influência do solo na reflectância da vegetação e, à medida que aumentou a biomassa devido ao desenvolvimento da cultura, houve menor contribuição da porção solo na reflectância, o que está de acordo com o relatado por Epiphanio *et al.* (1992), no estudo sobre a influência do comportamento espectral de solos.

Além disso, Pinto; Laus Neto; Pauletto (2004) classificaram os principais solos de terras baixas como Planossolos, Gleissolos e Plintossolos. Streck *et al.* (2008), apontaram que solos de terras baixas possuem como característica a predominância de textura franco-arenosa no horizonte superficial. Solos de textura arenosa tendem a acentuar essa influência na reflectância, devido à sua constituição mineralógica (rica em quartzo), e ao fato de geralmente apresentarem baixos teores de matéria orgânica e óxidos de ferro (DALMOLIN *et al.*, 2005).

#### 4.6.1.2 Estimativa do $K_c$ e $ET_c$ a partir do NDVI

As Figura 15 e 16 mostram a regressão linear entre a série temporal do NDVI e os valores de  $K_c$  tabelados pela FAO-56 para soja e milho, respectivamente.

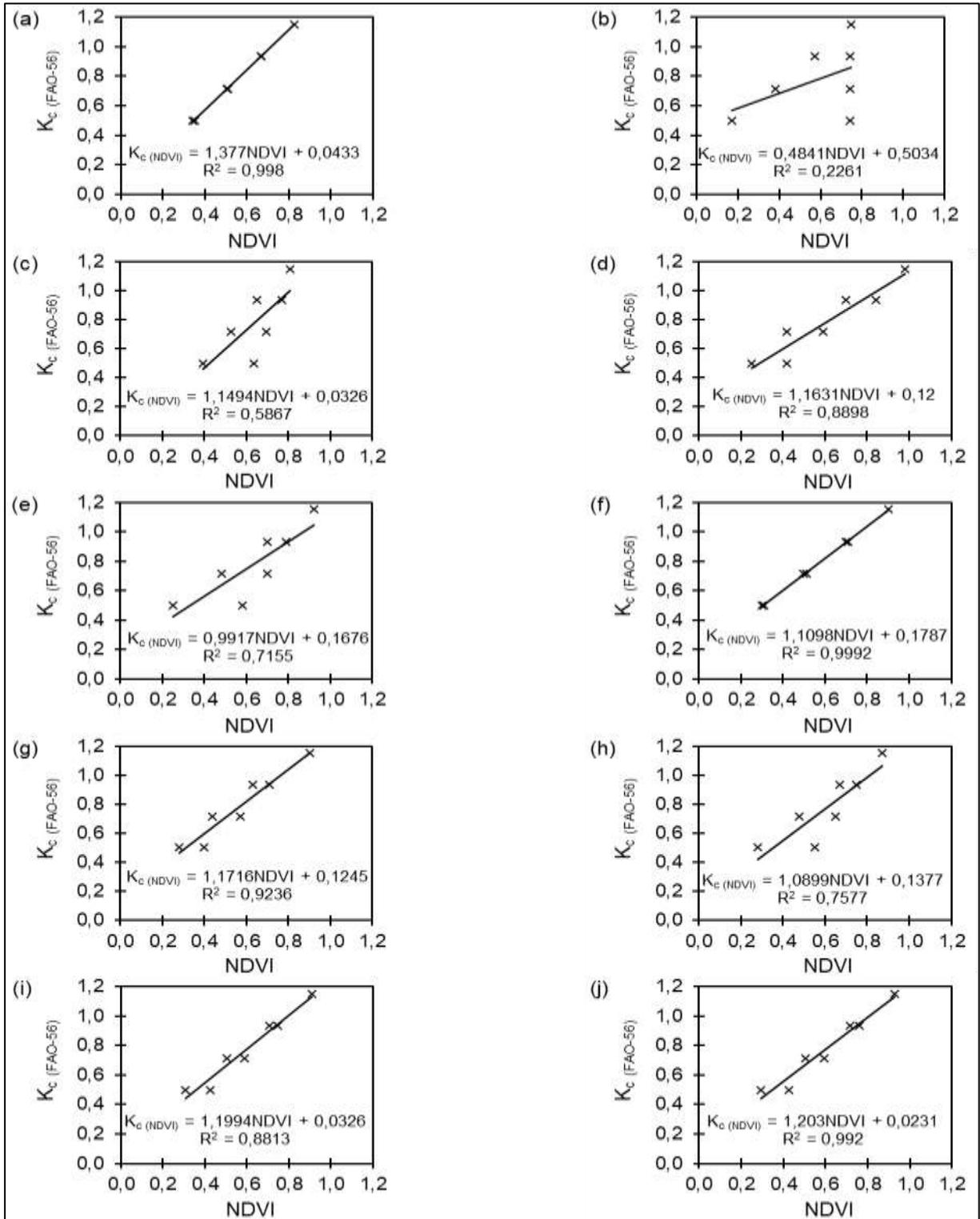


Figura 15 - Regressão linear entre os valores de  $K_c$  (FAO-56) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para a cultura da soja cultivada em sistema sulco-camalhão, durante o ano-safra 2019/20 - área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c); 2020/21 - área 1 (d), área 2 (e), área 4 (f), área 5 (g) e área 6 (h) e 2021/22 área 1 (i) e área 4 (j).

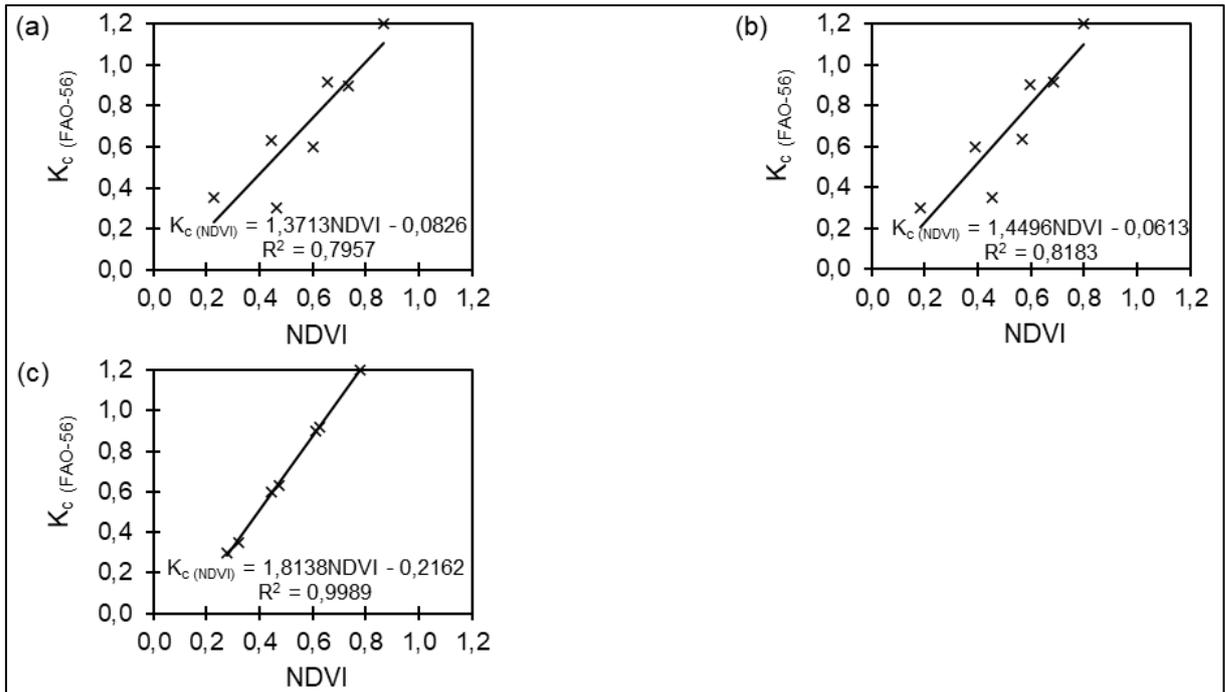


Figura 16 - Regressão linear entre os valores de  $K_c$  (FAO-56) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para a cultura do milho cultivado em sistema sulco-camalhão, na safra 2021/22 - área 7 (a), área 8 (b) e área 9 (c).

É possível observar uma relação positiva entre  $K_c$  (FAO-56) e  $K_c$  (NDVI) com valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,70 em quase todas as áreas. Em estudos similares, Er-Raki *et al.* (2013), encontrou um  $R^2$  de 0,63 para a cultura da soja e considerou aceitável, sendo utilizado por Gomes (2019). Esses resultados corroboram com os encontrados por Bezerra *et al.* (2010), onde confirmam a capacidade da reflectância espectral das culturas de estimar indiretamente os valores de  $K_c$ .

Os resultados de  $R^2$  obtidos neste estudo indicam o quão sensíveis os IVs são em relação a densidade do dossel associada à densidade de plantio, visto que nas áreas com menor número de imagens e/ou heterogeneidade da cultura, observou-se baixos  $R^2$ . Corroborando com Spiliotopoulos & Loukas (2019), que obtiveram um  $R^2$  de 0,96 na relação entre  $K_c$  e NDVI para o milho a partir de imagens Landsat 7 na Grécia, sendo utilizados para validar dados da safra posterior e concluíram que a metodologia é confiável, podendo ser aplicada em outros lugares, com aporte de dados de NDVI derivados de satélite quando assumido a homogeneidade da cultura.

Isso pode ser explicado pelo fato de que os IVs, são indicadores de biomassa verde e, portanto, espera-se que, em condições de maior biomassa, maior a  $ET_c$  daquele dossel (CHOUDHURY *et al.*, 1994; JENSEN & EPIPHANIO, 2009).

Sabendo disso, foi desenvolvida uma única equação para obtenção do  $K_c$  a partir dos valores de NDVI. Para tanto, no caso da soja exclui-se as áreas 2 e 3 da safra 2019/20, onde as relações entre  $K_c$  (FAO-56) e  $K_c$  (NDVI) apresentaram baixos valores de  $R^2$  (0,2261 e 0,5867) e para o milho, utilizando os valores disponíveis da safra 2021/22 a fim de aumentar a confiabilidade nas equações desenvolvidas. A figura 17 mostra essas novas e equações para as culturas de soja e milho cultivadas em sulco-camalhão.

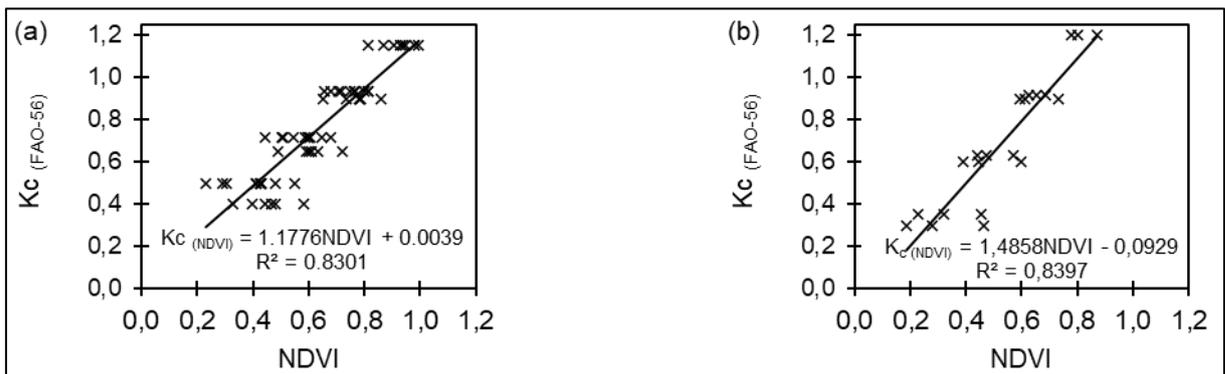


Figura 17 - Regressão linear entre os valores de  $K_c$  (FAO-56) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) em terras baixas: (a) para a cultura da soja e (b) para a cultura do milho.

Observa-se o padrão de variação das curvas de  $K_c$  (FAO-56) e  $K_c$  (NDVI) ao longo das safras, apresentando coeficiente ( $R^2$ ) maior de 0,83 para ambas as culturas, o valor de  $R^2$  maior do que (0,63) é considerado aceitável por Er-Raki *et al.* (2013). Valores semelhantes e considerados promissores pelos autores foram encontrados por Singh & Irmak (2009), onde desenvolveram  $K_c$  a partir do NDVI obtido de imagens dos satélites Landsat 5 e 7 e obtiveram  $R^2$  de 0,90 e 0,84 para soja e milho irrigados, respectivamente. A partir das novas equações apresentadas foi possível desenvolver as novas curvas de  $K_c$ , bem como os ajustes lineares entre elas (figura 18).

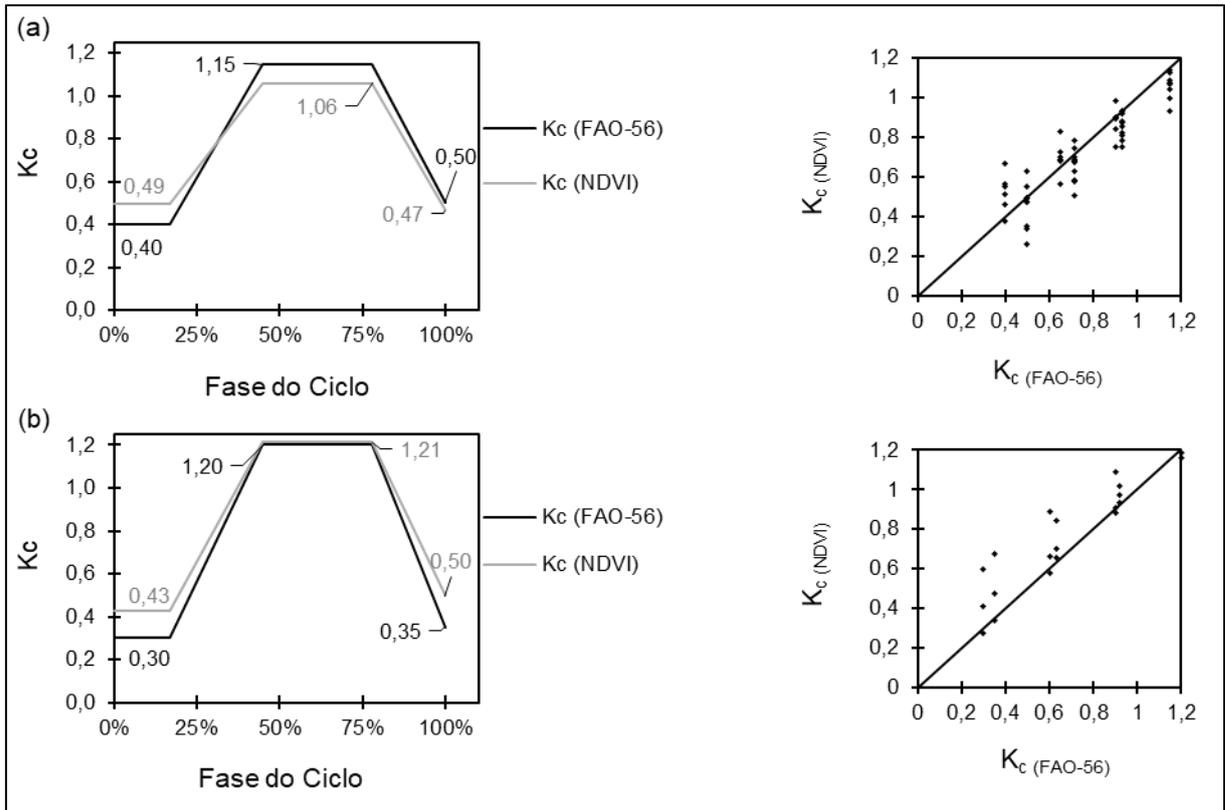


Figura 18 - Curvas  $K_c$  (FAO-56) e  $K_c$  (NDVI) ajustadas e seus gráficos de dispersão (a) soja e (b) milho.

Para a soja, os valores de  $K_c$  (NDVI) foram de 0,49, 1,06 e 0,47 para o  $K_{c1}$  inicial,  $K_{c3}$  médio e  $K_{c5}$  final, respectivamente, enquanto que, para o cultivo do milho, observou-se os valores de 0,43, 1,21 e 0,50 para o  $K_{c1}$  inicial,  $K_{c3}$  médio e  $K_{c5}$  final. Kersten (2018), encontrou para 0,15, 1,07 e 0,63, para o  $K_{c1}$  inicial,  $K_{c3}$  médio e  $K_{c5}$  final, respectivamente em estudo com metodologia similar para a cultura do milho. Observa-se uma similaridade da evolução temporal entre o  $K_c$  (FAO-56) e o  $K_c$  (NDVI), no entanto o  $K_c$  (NDVI) superestima na fase inicial do desenvolvimento para ambas culturas quando comparado  $K_c$  (FAO-56).

Na Tabela 17 estão apresentados os valores simulados acumulados das demandas hídricas e irrigações das culturas de soja e milho utilizando  $K_c$  (FAO-56) versus  $K_c$  (NDVI). Comparando-se os valores ajustados de  $K_c$  (NDVI) com os valores iniciais de  $K_c$  (FAO-56), observa-se maiores diferenças para  $K_{c1}$  inicial e, para o milho maior diferença no  $K_{c5}$  final. Apesar da similaridade entre os resultados obtidos neste estudo e os apresentados na tabela do Boletim FAO-56, há de se considerar que a metodologia proposta utilizando NDVI, visa o monitoramento da área agrícola e assume que toda e qualquer alteração que afete a produção de biomassa da cultura altera o requerimento hídrico da mesma.

Tabela 17 – Valores simulados das demandas hídricas e irrigações utilizando  $K_c$  (FAO-56) e  $K_c$  (NDVI) para as culturas de soja e milho cultivados em sulco-camalhão nas safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22.

Áreas	P	$K_c$ (FAO-56)		$K_c$ (NDVI)		RMSE ( $ET_c$ )
		$ET_c$ (FAO-56)	I	$ET_c$ (NDVI)	I	
Acumulado durante o ano-safra (mm)						
2019/20						
1	87,5	378,66	250	377,55	250	0,031
2	256	433,30	250	352,47	150	0,353
3	156	393,16	250	362,01	200	0,027
2020/21						
1	514,4	471,15	150	405,68	100	0,060
2	574	397,76	150	389,80	150	0,028
4	572,7	452,29	200	451,90	200	0,017
5	466,3	450,70	200	440,78	200	0,051
6	441,3	432,32	150	398,77	150	0,050
2021/22						
1	322,00	351,08	200	341,69	200	0,027
4	216,00	411,55	250	389,31	200	0,019
7	300,00	433,31	250	477,87	300	0,066
8	133,00	487,21	300	496,40	300	0,028
9	294,00	476,02	350	488,66	350	0,014

P: precipitação; I: irrigação simulada utilizando  $ET_c$  (FAO-56) e  $ET_c$  (NDVI) como componente de saída no BH; RMSE ( $ET_c$ ): Erro quadrático médio calculado entre  $ET_c$  (FAO-56) e  $ET_c$  (NDVI).

O maior RMSE ocorreu na área 2 em 2019/20 e pode ser explicado pelo atraso e baixa uniformidade da germinação da soja registrado nesta área, comparando as simulações utilizando  $K_c$ (FAO-56) e  $K_c$ (NDVI), observa-se uma superestimativa da  $ET_c$  (FAO-56) de 23%, representando um desperdício de 67% de irrigação. Djaman *et al.* (2018), estimaram a  $ET_c$  do milho usando  $K_c$  desenvolvido no campo e relataram superestimativa do  $K_c$  (FAO-56) que causou até 20% de desperdício de irrigação.

Nota-se também superestimativas nas lâminas de irrigação das simulações utilizando  $K_c$ (FAO-56) em áreas de soja que não registraram problemas de estabelecimento durante os ciclos (25% nas áreas 3 2019/20 e área 4 2021/22 e 50% na área 1 2020/21). Essas diferenças podem ocorrer por diversos fatores, visto que os valores de  $K_c$  são influenciados pelo clima da região, época e densidade de semeadura (ALLEN *et al.*, 1998), índice de área foliar (MEDEIROS *et al.*, 2001), área foliar (WILLIAMS; AYARS, 2005) e cobertura do solo (LÓPEZ-URREA *et al.*, 2009).

Por outro lado, para as áreas com milho safra 2021/22, houve subestimativa da  $ET_c$ (FAO-56), provocando na área 7 uma redução de 17% na lâmina de irrigação, Kharrou *et al.* (2011), observaram que a subestimativa da  $ET_c$  ocasionou uma redução no rendimento de até 38%. Portanto, torna-se relevante o acompanhamento do desenvolvimento da lavoura para utilização dos valores de  $K_c$  (FAO-56) para que, quando necessário faça-se a correção com o  $K_c$  (NDVI) visando a verdadeira  $ET_c$ , evitando sub ou superestimativa das irrigações e perdas de produtividade por estresse hídrico.

As figuras 19 e 20 mostram os BHs e a variação da água disponível no solo ao utilizar  $ET_c$  (FAO-56) e  $ET_c$  (NDVI) de cada área nas três safras.

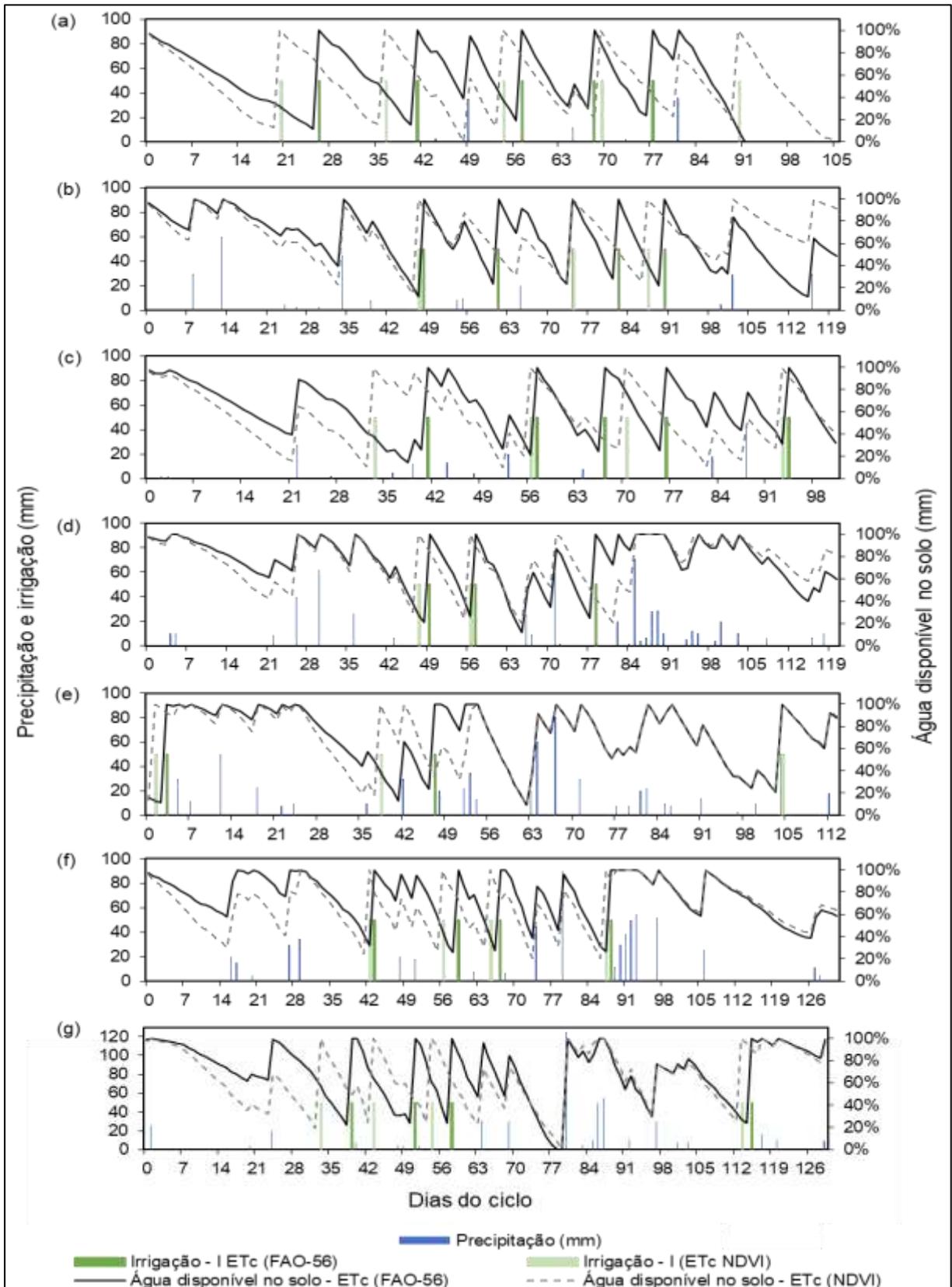


Figura 19 - Variação da água disponível no solo com base no  $ET_c$  (FAO-56) e simulado utilizando  $ET_c$  (NDVI) nas áreas de estudo na safra 2019/20 - área 1 (a), área 2 (b) e área 3 (c); 2020/21 - área 1 (d), área 2 (e), área 4 (f), área 5 (g).

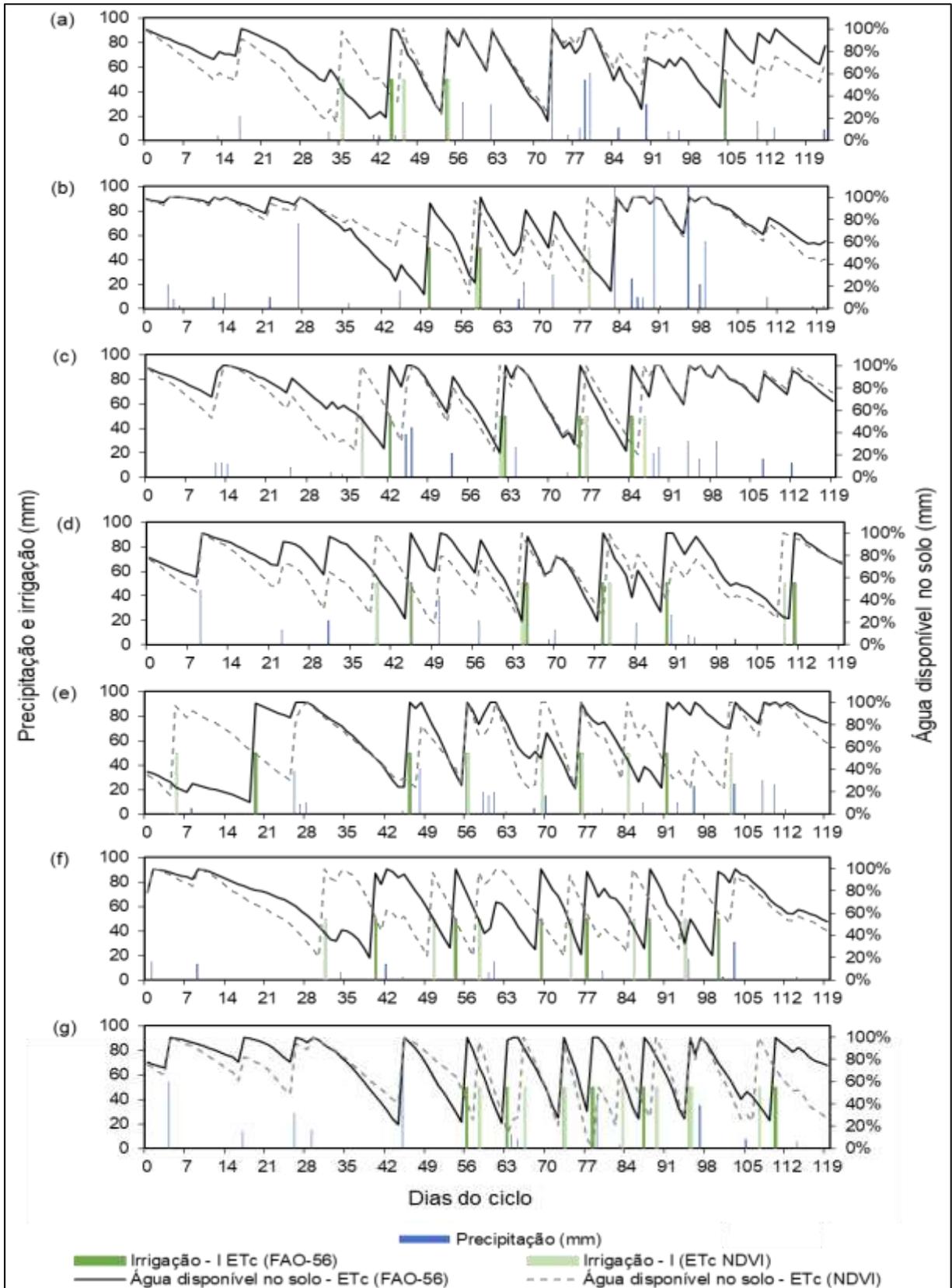


Figura 20 - Variação da água disponível no solo com base no  $ET_c$  (FAO-56) e simulado utilizando  $ET_c$  (NDVI) nas áreas de estudo na safra 2020/21 - área 6 (a) e área 7 (b); 2021/22 - área 1 (c), área 4 (d), área 7 (e), área 8 (f) e área 9 (g).

Para a soja, a área 4 da safra 2020/21 apresentou menor erro (RMSE) na comparação entre os valores de  $ET_c$  e para o milho o menor RMSE foi na área 9 na safra 2021/22, esses resultados estão relacionados ao melhor ajuste linear entre NDVI e  $K_c$  (FAO-56). Ressalta-se que na área 4 (2020/21) o período mais chuvoso coincidiu com o período de floração-formação do grão (R1-R5), entre 01/01/21 até 15/02/21, onde 406 do total de 572,70 mm de precipitação registrada ocorreu nesse período. De acordo com Gava (2014), para a soja, esse é o período em que o déficit hídrico mais influencia a produção de biomassa e conseqüentemente a produtividade de grãos.

Apesar dos valores de  $ET_c$  (FAO-56) e  $ET_c$  (NDVI) para soja e milho serem razoavelmente próximos, resultando em valores de  $R^2$  elevados (figuras 15 e 16), nota-se em geral, nas áreas de soja um atraso nos requisitos de irrigação ao usar  $ET_c$  (NDVI), devido aos menores valores de  $ET_c$  (NDVI) em comparação com  $ET_c$  (FAO-56).

Nota-se ainda que nas áreas 1 da safra 2019/20, áreas 2, 4, 5 e 6 da safra 2020/21 e área 1 da safra 2021/22, apresentam as mesmas exigências de irrigações embora as demandas hídricas obtidas nas simulações utilizando  $K_c$  (NDVI) apresentem ligeira redução em relação a simulações utilizando  $K_c$  (FAO). No entanto, nas áreas 2 e 3 da safra 2019/20 e na área 4 da safra 2021/22, a menor  $ET_c$  (NDVI) proporcionou uma redução de pelo menos uma irrigação com redução de duas irrigações (100 mm) na área 2 da safra 2019/20. Salienta-se que devido à baixa correlação entre o NDVI e  $ET_c$  (FAO-56) essa área não participou do ajuste que resultou na equação final e, portanto, o comportamento de maior erro era o esperado. Esses resultados coincidem com os relatados por Reyes-Gonzales *et al.* (2018), que em estudo similar concluíram que a  $ET_c$  calculada a partir de IVs subestimou os valores de  $ET_c$  calculados pelo método tradicional em até 18%. Por outro lado, nas três áreas de milho, a simulação utilizando  $K_c$  (NDVI) resultou em uma  $ET_c$  (NDVI) maior que a  $ET_c$  (FAO), sendo que na área 7 da safra 2021/22 essa maior  $ET_c$  (NDVI) resultou em uma maior exigência de irrigação.

Embora os valores de  $K_c$  (NDVI) e  $K_c$  (FAO-56) serem muito semelhantes, o  $K_c$  (FAO-56) é o mais utilizado, devido este estar prontamente disponibilizado em tabelas. No entanto, os resultados demonstram que em áreas onde a densidade da biomassa não esteja homogênea, os valores de  $K_c$  (NDVI) serve para ajustar a  $ET_c$  em qualquer fase do ciclo, adequando e eficientizando o uso da água da irrigação. Isto ocorre devido a  $ET_{c(NDVI)}$ , considerar a cobertura vegetal efetiva, se mostrando mais sensível aos impactos do manejo e desenvolvimento das culturas de soja e milho cultivadas em terras baixas irrigadas por sulco-camalhão.

#### 4.6.1.3 Estimativa da produtividade da soja e milho utilizando IVs

As figuras 21 e 22, mostram a relação entre os valores máximos de NDVI, SAVI, EVI e SR e a produtividade média obtida para as culturas de soja e milho, respectivamente.

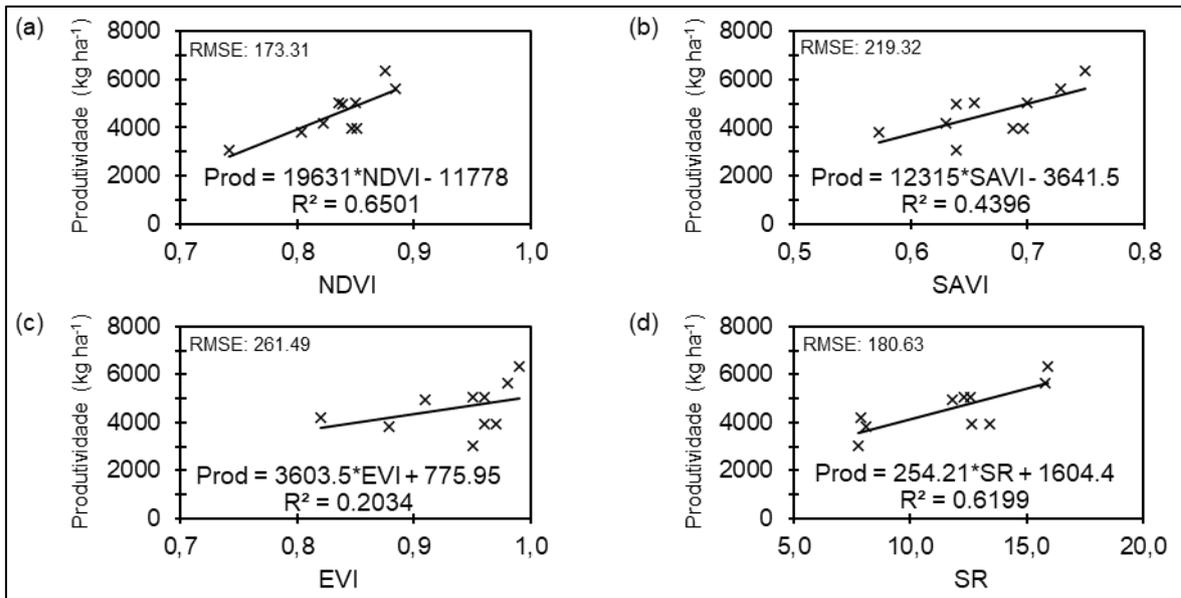


Figura 21 – Regressão linear entre os valores de produtividade obtida de grãos de soja cultivada em sistema sulco-camalhão safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22 e IVs: (a) NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*); (b) SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*); (c) EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e (d) SR (*Simple Ratio*).

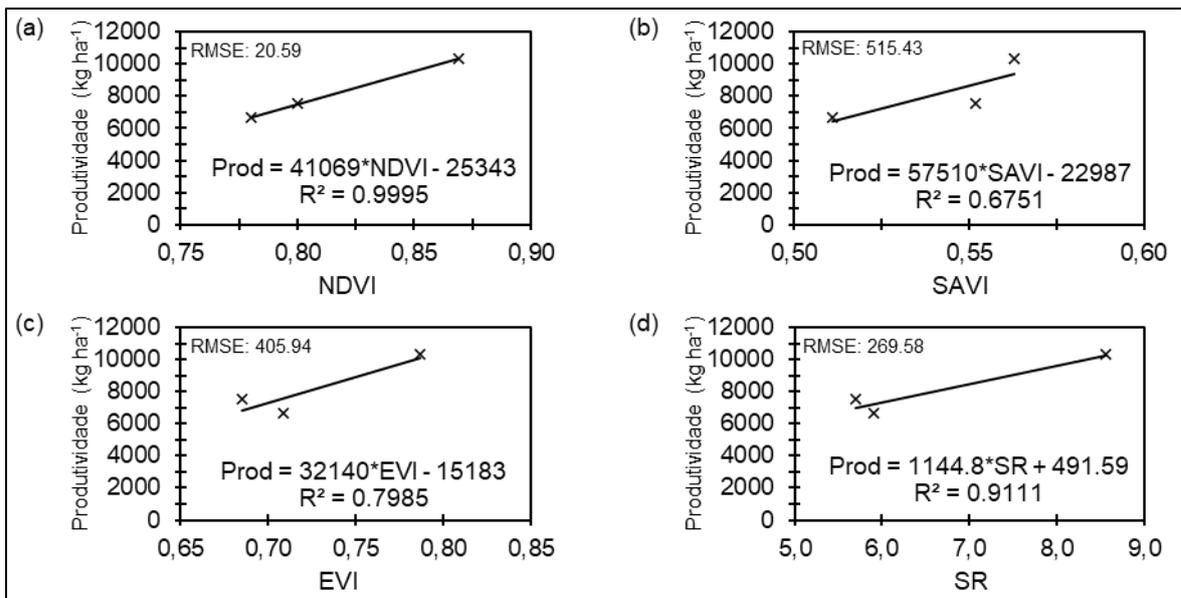


Figura 22 - Regressão linear entre os valores de produtividade obtida de grãos de milho cultivado em sistema sulco-camalhão safra 2021/22 e IVs: (a) NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*); (b) SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*); (c) EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e SR (*Simple Ratio*).

Pode-se observar, por meio dos coeficientes de determinação, que para ambas as culturas o NDVI e o SR foram as variáveis independentes que melhor explicaram a variável dependente (produtividade),  $R^2$  acima de 0,62 e 0,91, para soja e milho respectivamente. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Kross *et al.* (2015), que avaliaram índices de vegetação para estimativa de índice de área foliar e biomassa em cultura de milho e soja, e concluíram que o NDVI foi o que apresentou melhor desempenho para estimar a biomassa foliar seca. Nguy-Robertson *et al.* (2012), estimaram o índice de área de folha verde em milho e soja, combinando IVs para alcançar a sensibilidade máxima e identificaram que o SR apresenta sensibilidade quando a cultura está em seu máximo desenvolvimento vegetativo, ou seja, exatamente no período selecionado para análise de produtividade.

Bolton & Friedl (2013), ao estimarem a produtividade de soja, através da relação entre produtividade e NDVI, obtiveram  $R^2 = 0,69$  e média RMSE = 314,9 kg ha<sup>-1</sup> e consideraram um bom desempenho. Lião *et al.* (2019), em estudo na região de Ontário, Canadá, utilizaram um modelo de algoritmo simples na estimativa de rendimento, fundindo dados de imagens dos satélites Landsat-8 e MODIS para aumentar a resolução espaço-temporal. Com tal metodologia, melhoraram a precisão de estimativa de biomassa em cerca de 4%, encontrando RMSE entre produtividade observada e estimada de 828,6 kg ha<sup>-1</sup> para a cultura da soja e 1.463,3 kg ha<sup>-1</sup> para a cultura do milho, portanto erros maiores aos encontrados neste estudo para ambas as culturas.

Os IVs que apresentaram menor coeficiente de determinação para cultura da soja na área de estudo foram EVI, ( $R^2 = 0,20$  e RMSE = 261,49 kg ha<sup>-1</sup>) e o SAVI ( $R^2 = 0,44$  e RMSE = 219,32 kg ha<sup>-1</sup>), já para a cultura do milho nenhum IV apresentou  $R^2$  abaixo de 0,67. Ressalta-se que a série analisada de produtividades obtidas da soja é composta por um conjunto de dez dados somando os três anos de estudo, entre os quais quatro obtiveram produtividades abaixo da média geral (4.608,6 kg ha<sup>-1</sup>), desses aponta-se as produtividades das áreas 2 e 1 (safra 2019/20) as mais distantes dessa média, seguidas pelas áreas 5 e 6 (safra 2020/21), essas menores produtividades refletiram no baixo ajuste e conseqüentemente no maior erro.

Diante desses resultados, algumas ponderações podem ser feitas. O SAVI o qual é recomendado incrementar o fator de ajuste para o solo com culturas anuais ( $L_s = 0,5$ ), independentemente do tipo de solo, considera que tais culturas promovem uma

cobertura vegetal de densidade intermediária e tal fator minimizaria os efeitos da cor do solo nos resultados do índice (WASHINGTON-ALLEN; RAMSEY; WEST, 2004).

Já o EVI, além dos fatores de ganho ( $G = 2,5$ ), coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera ( $C1 = 6$  e  $C2 = 7,5$ ), também possui o fator de ajuste para o solo, onde ( $Le = 1$ ) é indicado na literatura (Justice *et al.*, 1998). Porém, os baixos valores de  $R^2$  apresentados para a cultura da soja para os IVs (SAVI e EVI) neste estudo apontam que em áreas onde a cobertura vegetal não tenha densidade intermediária no momento de máxima biomassa verde, devido a falhas nos manejos, por exemplo, esses fatores de ajustes não são adequados, logo não são adequados para esse tipo de análise no sistema sulco-camalhão, uma vez que, o sistema sulco-camalhão é caracterizado por apresentar altas densidades populacionais das plantas nos camalhões (linhas de plantio duplas ou triplas) e sulcos não semeados, fato que promove uma exposição ainda maior do solo.

#### **4.6.2 Estimativa da infiltração da água em solos de terras baixas no sistema sulco-camalhão através de dados medidos e simulados**

##### **4.6.2.1 Método SCS-CN padrão e SCS-CN<sub>m</sub> modificado**

Para o período estudado não foram contabilizados valores de  $P_{es}$  para precipitações inferiores a 10 mm, como também não foram detectados valores em ambas as simulações (SCS-CN e SCS-CN<sub>m</sub>). Assim, dos onze eventos compreendidos no período, foram analisados seis eventos de precipitação que geraram escoamento superficial. A figura 23 apresenta a relação linear entre os valores de  $P_{es}$  medidos e  $P_{es}$  estimados a partir do valor de CN padrão obtido do manual SCS (SCS, 1972) e ainda a relação linear entre os valores de escoamento medido e o escoamento estimado pós a obtenção do CN<sub>m</sub> e  $\lambda_m$ .

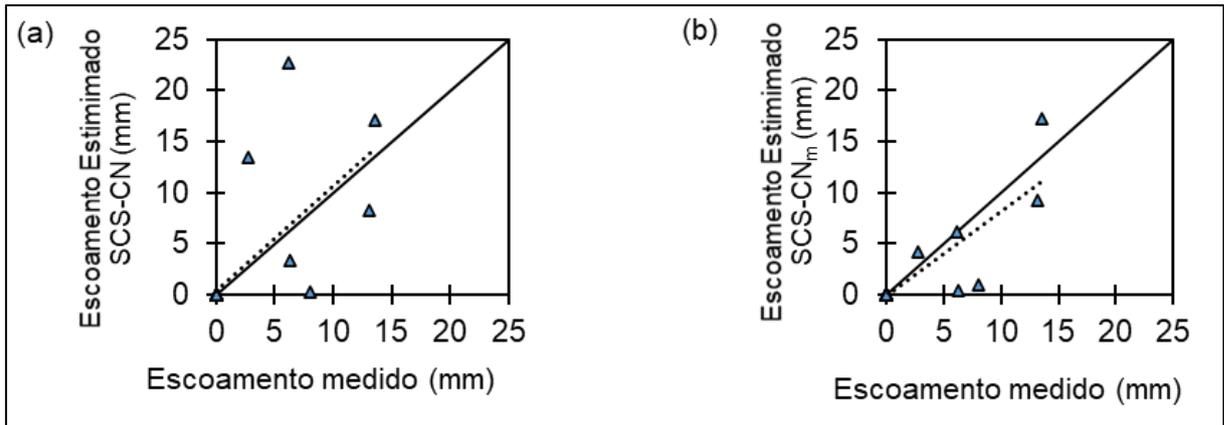


Figura 23 - Volume de escoamento superficial medido (a) versus escoamento estimado pelo método SCS-CN padrão e (b) versus escoamento estimado pelo método SCS-CN<sub>m</sub>

A figura 23 mostra que nos eventos estudados o método CN padrão superestimou metade dos eventos de escoamento superficial e subestimou a outra metade. Observou-se que o modelo padrão utilizado tende a superestimar quando o solo se encontra em AM<sub>III</sub>, ou seja, quando as condições de umidade antecedente (*Antecedent Moisture*) do solo estão próximas à saturação. Por outro lado, o modelo subestima o escoamento superficial quando o solo se encontra em AM<sub>I</sub>, ou seja, quando o solo está seco, ou as precipitações antecedentes de 5 dias não ultrapassaram 15 mm. A subestimação pode ser inerente ao valor fixo para  $\lambda$  (0,2), onde o modelo padrão prevê que 20% é retido através da taxa de captação inicial, porém em eventos de pequenos volumes precipitados dependendo do estágio de desenvolvimento da cultura 20% de  $\lambda$  pode estar superestimando a abstração inicial (Ia), essa observação corrobora com os resultados apontados por Huang *et al.* (2007), que ajustaram  $\lambda$  em solos íngremes no Planalto de Loess na China e aumentou a eficiência do modelo SCS-CN quando utilizado 0,001 na taxa de abstração inicial.

Jiao *et al.* (2015), modificaram o método SCS-CN com base em dados de escoamento superficial observados em quatro sistemas de cultivo e três áreas de drenagem, obtendo melhor previsão do escoamento ao propor um método de abstração inicial variável, ampliando ou reduzindo conforme a quantidade de armazenamento de água antecedente à cultura.

Nota-se que quando são utilizados os novos valores de CN<sub>m</sub> e  $\lambda_m$ , o modelo proposto tende a subestimar a maioria dos eventos, mas ainda seguindo o padrão de sub e superestimar quando os solos se encontram em AM<sub>I</sub> e AM<sub>III</sub>, respectivamente. Esse comportamento ocorre da mesma maneira ao observado com o método SCS-CN padrão, porém com diferenças menores entre os valores medidos e estimados.

Isso corrobora com os resultados encontrados nos trabalhos de Bhuyan; Mankin; Koelliker (2003), Jacobs; Myers; Whitfield (2003), Huang *et al.* (2007), os quais indicaram que, entre os vários fatores que fazem com que o método CN padrão subestime o volume de escoamento, o AMC é o mais influente.

Além disso, o método proposto nesse trabalho seguiu os passos do SCS-CN padrão, ou seja, determinando o AMC a partir das precipitações dos cinco dias anteriores e corrigindo os  $CN_I$  e  $CN_{III}$  a partir do  $CN_{II}$ .

A Tabela 18 mostra os valores obtidos para os parâmetros utilizados no SCS-CN padrão e os ajustados através dos dados medidos e a estatística de desempenho para os modelos testados.

Tabela 18 - Estatística de desempenho para os modelos SCS-CN padrão e modificado para previsão de escoamento de precipitação.

Método	$CN_I$	$CN_{II}$	$CN_{III}$	$\lambda$	Regressão linear			E
					Intercepção	Inclinação	R <sup>2</sup>	
SCS-CN	67,22	83	91,82	0,2	0,281	1,037	0,498	0,73
SCS-CN <sub>m</sub>	60,20	56,16	74,35	0,1	-0,067	0,828	0,759	0,86

Nota-se que o método ajustado influenciou sobretudo na obtenção do  $CN_{II}$  e  $CN_{III}$ , ou seja, quando as condições da umidade do solo estão entre a situação classificada como de média umidade até a próxima da saturação. No CN padrão, a obtenção do  $CN_{II}$  na condição tabelada e posteriormente ajustada para  $CN_{III}$ , está mais próxima de 100 (considerada totalmente impermeável) do que no novo CN<sub>m</sub>. Esse fato demonstra que no sistema sulco-camalhão os solos de terras baixas apresentam alterações significativas das características físico-hídricas naturais, ou seja, cumprindo seu propósito de melhor drenagem através dos sulcos e melhor condição hídrica para o desenvolvimento radicular das culturas de sequeiro nos camalhões (PARFITT *et al.*, 2019).

#### 4.6.2.2 Relações entre a umidade do solo e métodos SCS-CN e SCS-CN<sub>m</sub>

Irmak *et al.* (2014) indicam que ao utilizar o sensor Watermark para manejar campos irrigados por gravidade em sulcos, deve-se utilizar no mínimo duas estações de monitoramento, uma instalada a cerca de 30 metros do início do sulco e a segunda a cerca de 2/3 do caminho, visto que essas áreas são mais propensas a ter menos

percolação e assim evitando a condição de saturação constante e conseqüentemente não prejudicando a tomada de decisão dos produtores irrigantes.

Embora não tenham sido realizadas irrigações na área experimental, o experimento ocorreu em período de precipitações frequentes, provocando condições de saturação praticamente constante no TM e TI, o que inviabilizou as análises nesses terços. Portanto, com base nos resultados obtidos no local do experimento, o uso dos valores medidos de TSC10, TSC25 e TSS10 são os mais adequados para comparar às previsões de escoamento superficial com os métodos testados.

A Tabela 19 apresenta os resultados de RMSE e o  $R^2$  obtidos entre os valores de ARM (mm) medidos em comparação aos de ARM (mm) simulados, contabilizando a entrada de  $P_{ef}$  estimada a partir dos modelos SCS-CN padrão e o SCS-CN<sub>m</sub> proposto para TS nas três profundidades.

Tabela 19 - Armazenamento de água no solo ( $\Delta$ ARM) medido versus simulações do ( $\Delta$ ARM) com base na infiltração calculada através dos modelos SCS-CN antes e depois da modificação dos parâmetros.

Posição e profundidade	Medido			SCS-CN				SCS-CN <sub>m</sub>			
	P	$P_{ef}$	$P_{es}$	RMSE	$R^2$	$P_{ef}$	$P_{es}$	RMSE	$R^2$	$P_{ef}$	$P_{es}$
	mm			mm		mm		mm		Mm	
TSC10				11,25	0,76			10,35	0,83		
TSC25	293,0	243,1	49,9	8,30	0,70	228	65	6,35	0,72	254,8	38,2
TSS10				13,18	0,32			12,21	0,64		

P: precipitação;  $P_{ef}$ : precipitação infiltrada;  $P_{es}$ : precipitação escoada

Os resultados de RMSE e  $R^2$  demonstram que o modelo SCS-CN<sub>m</sub> apresentou melhores desempenhos nas três profundidades, quando comparado aos resultados do modelo SCS-CN padrão. O modelo padrão, ainda que tenha subestimado pequenos eventos de precipitação, em geral superestimou  $P_{es}$  em 30,2%, devido a superestimativa dos maiores eventos de 61, 58 e 80 mm registrados em um intervalo de apenas 15 dias. Já o modelo modificado subestimou em 23,5%

Na figura 24 apresenta a  $\Delta$ ARM simulada a partir da contabilização das saídas ( $ET_c$ ) e entradas diárias ( $P_{ef}$ ) obtidas através dos modelos SCS-CN e SCS-CN<sub>m</sub> para as três profundidades do TS.

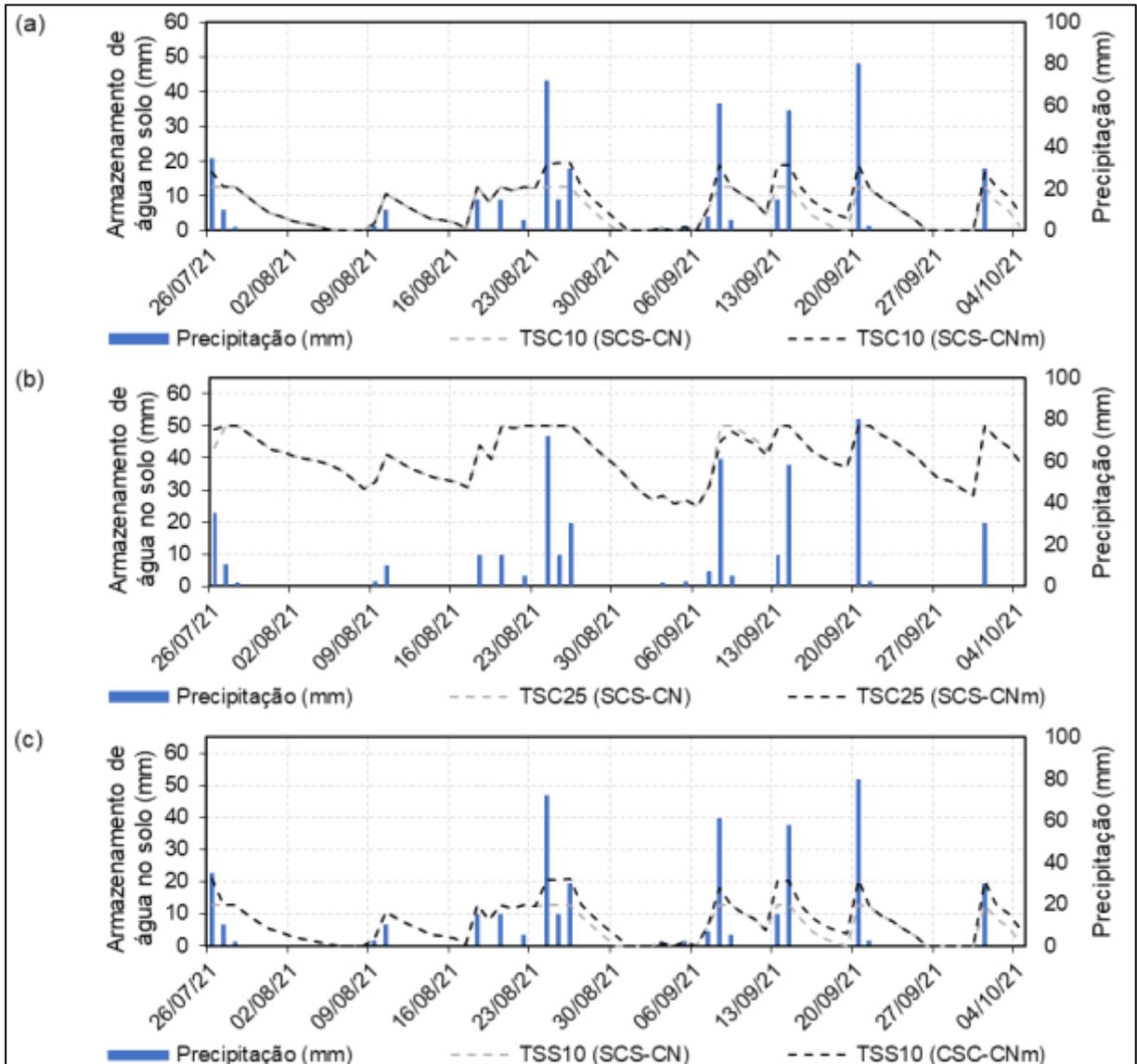


Figura 24 - Variação dos valores de  $\Delta$ ARM simulados através dos modelos SCS-CN e SCS-CN<sub>m</sub> em: (a) Camalhão - 10 cm; (b) Camalhão - 25 cm; (c) Sulco - 10 cm.

Conforme apresentado na figura 24 observa-se que as simulações da  $\Delta$ ARM através dos modelos SCS-CN e SCS-CN<sub>m</sub> (linhas pontilhadas preta e cinza das (Figuras 24a e 24c) permitiram avaliar a presença de esgotamento hídrico (armazenamento de água no solo = “zero”) nas profundidades de 10 cm do camalhão e do sulco, essa maior sensibilidade ocorre devido a maior influência da camada superficial aos fluxos evapotranspirativos, por outro lado, na profundidade de 25 cm no camalhão, o ARM se manteve acima de 24,9 mm, ou seja, sem eventos de esgotamento hídrico nessa profundidade.

No que tange o uso do modelo SCS-CN (padrão ou modificado) para o manejo da irrigação, ressalta-se que a instalação do sensor de umidade na profundidade de 10 cm no camalhão influenciará a maioria das culturas de sequeiro nos primeiros

estádios de desenvolvimento, ou seja, da sementeira até parte do período vegetativo (dependendo da cultura), que coincide com a menor demanda evapotranspirativa. Já a instalação de sensores na profundidade de 25 cm, é a utilizada durante um maior período, do vegetativo até a maturação, conforme o desenvolvimento do sistema radicular.

Portanto, em condições semelhantes às do experimento, embora o SCS-CN<sub>m</sub> tenha apresentado melhores resultados nas diferentes profundidades, ambos modelos testados não representam riscos de estresse hídrico às culturas, visto que, o período e a cultura adotados no experimento não foram favoráveis à ocorrência de estresse hídrico por escassez de precipitações, o que geralmente ocorre nos ciclos das culturas de primavera/verão.

## 5 Conclusões

O modelo de BH calibrado com parâmetros disponíveis na literatura se mostrou eficiente para otimizar o manejo da irrigação, com incremento médio de produtividade de 29 sc ha<sup>-1</sup> nas áreas de soja irrigada.

Existe deficiência hídrica, com a relação ( $ET_r/ET_c$ ) classificada como de alto risco, durante os períodos críticos da soja e do milho não irrigados nas diferentes regiões de terras baixas do Rio Grande do Sul.

A produtividade da água  $WP_{Total}$  e  $WP_{Irrig}$  na produção de soja e milho é variável, em função da distribuição local das precipitações, principalmente no período reprodutivo da cultura, além das características do solo, cultivar e manejos agrônômicos adotados. No entanto, mostrou-se mais eficiente para o milho.

Os valores de  $K_c$  estimados a partir do processamento de dados de sensoriamento remoto fornecem informações mais precisas para determinar a demanda hídrica das culturas de soja e milho, promovendo a melhor eficiência do uso da água no sistema sulco-camalhão.

Os IVs NDVI e SR são apontados como os índices mais adequados para estimar a produtividade de soja e milho cultivados em sulco-camalhão em terras baixas.

O modelo modificado SCS-CN<sub>m</sub> ajustando  $CN_m = 56,16$  e  $\lambda_m = 0,1$  apresentou melhor ajuste, com eficiência  $E = 0,83$ , e subestimou em apenas 23,5% os eventos de escoamento.

## **6 Sugestões para estudos futuros**

Sabendo que a irrigação de um modo geral reduz estresses por altas temperaturas no solo, sugere-se a avaliação do efeito da irrigação via sulco-camalhão na redução da temperatura do solo.

Diante da importância do monitoramento das condições de estabelecimento e desenvolvimento das culturas ao longo do ciclo, sugere o monitoramento em tempo real através de imagens com menor período de visitação na área, sendo apontado como ideal a utilização de drones equipado com câmera multiespectral seguido da aquisição de imagens de outros satélites com melhores resoluções temporais e espaciais.

Embora o modelo modificado no presente estudo SCS-CN<sub>m</sub> tenha apresentado melhores resultados na estimativa do escoamento superficial, sugere-se que a metodologia proposta seja testada em épocas e culturas diferentes a fim de ajustar os parâmetros em condições de maiores riscos de estresse hídrico às culturas.

## Referências

AJMAL, M.; MOON, G.; AHN, J.; KIM, T. Investigation of SCS-CN and its inspired modified models for runoff estimation in South Korean watersheds. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 9, p. 592–603, 2015.

AKPINAR, B. A.; LUCAS, S. J.; BUDAK, H. Genomics approaches for crop improvement against abiotic stress. **Scientific World Journal**. 2013.

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

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, n.4, p.380-394, 2007.

ÁVILA, V. S.; PETRY, M. T.; CARLESSO, R.; MARTINS, J. D.; GONZÁLES, M. G.; OLIVEIRA, Z. B. DE. Simulation of soil water balance and partitioning of evapotranspiration of maize grown in two growing seasons in Southern Brazil. **Ciência Rural**, v. 47, n. 2, 2017.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MÜLLER, A. G.; FRANÇA, S.; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.; PEREIRA, P. G. Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 2, 2006.

BERLATO, M. A., MATZENAUER, R., BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação do tanque classe A e radiação solar global. **Agron. Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, 243-259, 1986.

BERLATO, Moacir Antônio. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul**. 1987. 93f. Tese (Doutorado em Meteorologia). Curso de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1987.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B. DA., BEZERRA, J. R. C.; BRANDÃO, Z. N. Evapotranspiração real obtida através da relação entre o coeficiente dual de cultura da FAO-56 e o NDVI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 404-414, 2010.

BHUYAN, S. J.; MANKIN, K. R.; KOELLIKER, J. K. Watershed-scale AMC selection for hydrologic modeling. **Transactions of the ASAE**, v. 46, n. 2, p. 303–310, 2003.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo a penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 975–983, 2008.

BOEIRA, L. dos. S.; NETO, M. B.; NEVES, L. de. A.; TERRA, V. S. S.; COLLARES, G. L. Evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith em anos de ENOS para a microrregião de Pelotas-RS. **Irriga.**, v. 25, n. 3, p. 537-548, 2020.

BOLTON, D. K.; FRIEDL, M. A. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 173, p. 74-84, 2013.

BONOW, J. F. L.; THEISEN, G.; XAVIER, F. M. Milho cultivado em Terras Baixas em sistema de camalhões de base larga: resultado de seis safras. In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 58, 2013, Pelotas. **Anais [...]**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2013. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/981511/1/JoiceBonow>. Acesso em: 07 set. 2020.

BOUMA, J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. **Advances in Agronomy**, v. 46, p. 1–37, 1991.

BUENO, M. V.; CAMPOS, A. D. S.; SILVA, J. T.; MASSEY, J. TIMM, L. C.; FARIA, L. C.; ROEL, A.; PARFITT, J. M. B. Improving the Drainage and Irrigation Efficiency of Lowland Soils: Land-Forming Options for Southern Brazil. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.146, n.8:04020019, 2020.

BURT, C. M.; CLEMMENS, A. J.; STRELKOFF, T. S.; SOLOMON, K. H.; BLIESNER, R. D.; HARDY, L. A.; HOWELL, T. A.; EISENHAUER, D. E. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v.123, n. 6, p. 423-442, 1997.

CAMILO, J. A.; TIGGES, C. H. P.; ANDRADE, C. de L. T. DE.; RESENDE, A. V. de.; BORGHI, E. **Produtividade da água do milho irrigado para diferentes condições de manejo do sistema de produção**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 16 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 235), 2019.

CAMPOS, I.; NEALE, C. M. U.; SUYKER, A. E.; ARKEBAUER, T. J.; GONÇALVES, I. Z. Reflectance – based crop coefficients REDUX: For operational evapotranspiration estimates in the age of high producing hybrid varieties. **Agricultural Water Management**, v. 187, p. 140-153, 2017.

CASSOL, G. V.; MARCHESAN, E.; MASSEY, J. H.; ROBAINA, A. D.; TRIVISOLI, V.S.; WERLE, I.; GOLLO, E. A.; GIACOMELI, R.; SCHMATZ, R. Raised seedbeds and irrigation increase the yield of soybean rotated with rice in lowland of Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.55, e01398, 2020.

CAZIER, D. J.; HAWKINS, R. H. Regional application of the curve number method. In *Water Today and Tomorrow, Proceedings, ASCE Irrigation and Drainage Division Special Conference, Replogle JA* (ed.). **ASCE**: New York, NY, 1984.

CESB - Comitê estratégico soja Brasil. **Fórum Nacional de Máxima Produtividade: case campeão, região sul e nacional (safra 2019/20)**, 2020. Disponível em: <<https://www.cesbrasil.org.br/case-campeao-19-20-cat-irrigado/case-irrigado-paulo-sentelhas-2?edmc=2609>>. Acesso em: 05 de maio de 2021.

CHOUDHURY, B. J.; AHMED, N. U.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; DAUGHTRY, C. S. T. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. **Remote Sensing of Environment**, v. 50, p. 1-17, 1994.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. International Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1988.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento, 2022. **Série histórica de produção de milho total**. Safras 1976/77 a 2021/22. <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/910-Milho>.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: **safra 2019/2020**, 7, 12 (Décimo segundo levantamento), 2020. Disponível em: <[https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/33204\\_cde9c4387246e0183dce957d4d6478b7](https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/33204_cde9c4387246e0183dce957d4d6478b7)>. Acesso em: 05 de maio de 2021.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: **safra 2020/2021**. 8, 12 (Décimo segundo levantamento), 2021. Disponível em: <[https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/39034\\_3ccad80c555e633d26ed7fb5e9393037](https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/39034_3ccad80c555e633d26ed7fb5e9393037)>. Acesso em: 05 de maio de 2021.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: **safra 2020/2021**. 9, 8 (Oitavo levantamento), 2022. Disponível em: <[https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/42059\\_dacda7ac44e3141124fac1a747b2f095](https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/42059_dacda7ac44e3141124fac1a747b2f095)>. Acesso em: 05 de maio de 2021.

CONCENÇO, G.; DEL AGUILA, L. S. H.; VERNETTI Jr., F. J. de. Produtividade da soja no Rio Grande do Sul: Genética ou Manejo? **Revista Cultivar – Grandes Culturas**, n. 221, ano XVIII, 2017.

CONCENÇO, G.; PARFITT, J. M. B.; SINNEMANN, C. S.; CAMPO, A. D. S.; VEIGA, A. B.; BERGMANN, H. M.; MELO, T. S.; SILVA, L. B. X. Semeadura direta de arroz em resteva de soja cultivada no sistema sulco-camalhão. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 13221-13231, 2020.

COPAAERGS, Conselho Permanente de Agrometeorologia Aplicada do Estado do Rio Grande do Sul. Prognósticos e recomendações para o período Abr/Mai/Jun 2022. **Boletim de informações nº60**. março 2022. <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202204/01145645-boletim-copaaergs-marco-2022-final-3.pdf>.

CORDEIRO, A. P. A.; BERLATO, M. A.; ALVES, R. de. C. M. Tendência do índice hídrico sazonal do Rio Grande do Sul e sua relação com El Niño e La Niña. **Anuário Igeo**. v. 41, p. 216-226, 2018.

- CRUZ, M. A. S.; SOUZA, A. M. B.; JESUS, J. S. Avaliação da cobertura vegetal por meio dos Índices de Vegetação SR, NDVI, SAVI e EVI na bacia do rio Japaratuba-Mirim em Sergipe. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011, Curitiba, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 1357-1365.
- CRUZ-BLANCO, M.; LORITE, I. J.; SANTOS, C. An innovative remote sensing based reference evapotranspiration method to support irrigation water management under semi-arid conditions. **Agricultural Water Management**, v.131, p.135–145, 2014.
- CUNHA, G. R. da.; BARNI, n. A.; HAAS, J. C.; MALUF, J. R. T.; MATZENAUER, R.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M. B. M.; PIRES, J. L. F. Zoneamento agrícola e época de semeadura para a soja no Rio grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 446-459, 2001.
- DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; KLAMT, E.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, v. 35, n. 2, p. 481-489, 2005.
- DILE, Yihun Taddele; KARLBERG, Louise; SRINIVASAN, Raghavan; ROCKSTRÖM, Johan. Investigation of the Curve Number method for surface runoff estimation in tropical regions. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 52, n. 5, p. 1011 – 1279, 2016.
- DJAMAN, K.; O'NEILL, M.; OWEN, C. K.; SMEAL, D.; KOUDAHE, K.; WEST, M.; ALLEN, S.; LOMBARD, K.; IRMAK, S. Crop evapotranspiration, irrigation water requirement and water productivity of maize from meteorological data under semiarid climate. **Water** (Switzerland), v. 10, n. 4, p.405, 2018.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H., **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 193 p. (FAO-Irrigation and Drainage Paper n. 33), 1979.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. FAO, Rome, Italy. (Irrigation and Drainage Paper, 24), 1977.
- DRERUP, P.; BRUECK, H.; SCHERER, H. W. Evapotranspiration of winter wheat estimated with the FAO 56 approach and NDVI measurements in a temperate humid climate of NW Europe. **Agricultural Water Management**, v. 192, p. 180-188, 2017.
- DUBREUIL, V.; FANTE, K. P.; PLANCHON, O.; NETO, J. L. S.; Les types de climats annuels au Brésil: une application de la classification de Köppen de 1961 à 2015. **EchoGéo**, v. 41, p. 1-26, 2017.
- EMATER/RS-ASCAR. **Safras de verão 2020/2021: Estimativas atuais de área, produtividade e produção**. Disponível em: <[http://www.emater.tche.br/site/arquivos\\_pdf/safra/safraTabela\\_25032021.pdf](http://www.emater.tche.br/site/arquivos_pdf/safra/safraTabela_25032021.pdf)>. Acesso em: 16 abr. 2021.
- EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; VALERIANO, M. M.; OLIVEIRA, J. B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos, WE/MCT, 132p, 1992.

ER-RAKI, S.; CHENBOUNI, A.; GUEMOURIA, N.; DUCHEMIN, B.; EZZAHAR, J.; HADRIA, R. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. **Agricultural Water Management**, v. 87, n. 1, p. 41-54, 2007.

ER-RAKI, S.; RODRIGUEZ, J. C.; GARATUZA-PAYAN, J.; WATTS, C. J.; CHEHBOUNI, A. Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. **Agriculture Water Management**, v. 122, p. 12–19, 2013.

FARACO, J. R.; CASTRO, N. M. dos R.; LOUZADA, J. A.; DA SILVA, P. R. F.; SCHOENFELD, R.; MAASS, M. B.; PAGLIARINI, N. Rendimento de grãos e eficiência do uso de água da cultura do milho em áreas de cultivo de arroz inundado com diferente manejo de irrigação e drenagem. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 274, 2018.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. In: MONTEIRO, J. R. B. A. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, p. 263-277, 2009.

FERNANDES, F. O.; ROSA, A. P. S.A; AVILA, J. A; CHRISTI, L.; MARTINS, J. F. S.; BELARMINO, L. C. Performance of soybean cultivars in management pest management in the lowland agroecosystem. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.15, n.1, 2020.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 49p. 2017.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N. DE.; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 137, p. 178-185, 2012.

FU, S.; ZHANG, G.; WANG, N.; LUO, L. Initial abstraction ratio in the SCS-CN method in the loess plateau of China Transact. **ASABE**, v. 54, n. 1, p. 163-169, 2011.

GANEM, K. A.; BAPTISTA, G. M. M. de.; ROCHA, W. J. de. S. A. F. da.; VASCONCELLOS, R. N.; ROSA, M. R.; SOUZA, D. de. T. M. Comparação entre dados com e sem correção atmosférica na classificação da cobertura da Terra de uma área da Caatinga utilizando o Google Earth Engine. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 69/6, p.1053-1074, 2017.

GASTAL, M. F. C.; RAUPP, A. A. A.; SILVA, C. A. S.; PARFITT, J. M. B.; PORTO, M. P. M.; BRANÇÃO, N. Rotação e sucessão de culturas em áreas de várzea. In: GOMES, A. da S.; MAGALHÃES JR. A.M. (Eds.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. Cap.23, p.799-830.

GAVA, R. **Os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja (*Glycine max (L.)* Merrill)**. (Tese de Doutorado). Universidade de São Paulo – ESALQ, Piracicaba, SP, 2014.

- GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particles size analysis In: KLUTE, A. (ed). Methods of Soil Analysis. 2<sup>a</sup> ed. Madison, Wisconsin USA. **American Society of Agronomy**, p. 383-411, 1986.
- GEETHA, K.; MISHRA, S. K.; ELDHO, T. I.; RASTOGI, A. K.; PANDEY, R. P. SCSCN-based Continuous Simulation Model for Hydrologic Forecasting. **Water Resources Management**. v. 22, n. 2, p. 165-190, 2008.
- GIMÉNEZ, L.; PAREDES, P.; PEREIRA, L. Water Use and Yield of Soybean under Various Irrigation Regimes and Severe Water Stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc Models. **Water**, v.9, n.6 p.393-411, 2017.
- GITELSON, A. A.; PEN, Y.; HUENNRICH, K. F. Relationship between fraction of radiation absorbed by photosynthesizing maize and soybean canopies and NDVI from remotely sensed data taken at close range and from MODIS 250 m resolution data. **Remote Sensing of Environment**, v. 147, p. 108-120, 2114.
- GITHIRI, S. M.; WATANABE, S.; HARADA, K.; TAKAHASHI, R.; QTL analysis of flooding tolerance in soybean at an early vegetative growth Stage. **Plant Breeding**, v. 25, n. 613-618, 2006.
- GOLLO, E. A.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; GOULART, R. Z.; NETO, M. C. Irrigation water management techniques for lowland furrow-irrigated soybean in southern Brazil. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.41, n.2, p.127-134, 2021.
- GOMES, A. S.; SILVA, C. A. S. de.; PARFITT, J. M. B.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S. **Caracterização de indicadores da qualidade do solo, com ênfase às áreas de várzea do Rio Grande do Sul**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 40 p. (Documentos, 169), 2006.
- GOMES, Maryane Diniz de Araújo. 2019. **Coefficiente de cultivo para a videira com base no índice de vegetação por diferença normalizada obtido com uso de VANT**. (Tese de Doutorado). Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp, Botucatu, SP, 2019.
- GONZÁLEZ-DUGO, M. P.; ESCUIN, S.; CANO, F.; CIFUENTES, V.; PADILLA, F. L. M.; TIRADO, J. L.; OYONARTE, N.; FERNÁNDEZ, P.; MATEOS, L. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. II. Application on basin scale. **Agricultural Water management**, v.125, p.92-104, 2013.
- GOOGLE. Google Earth Engine website. <http://earthengine.google.com/>, 2022.
- GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017.
- GU, Y.; WYLIE, B. K.; HOWARD, D. M.; PHUYAL, K. P.; JI, L. NDVI saturation adjustment: A new approach for improving cropland performance estimates in the Greater Platte River Basin, USA. **Ecological Indicators**, v. 30, p. 1–6, 2013.

HAGHIABI, A. H.; ABEDI-KOUPAI, J.; HEIDARPOUR, M.; HABILI, J. M. A new method for estimating the parameters of Kostiakov and modified Kostiakov infiltration equations. **World Applied Sciences Journal**, v.15, n. 1, p. 129–135, 2011.

HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; MOORE, R.; HANCHER, M.; TURUBANOVA, S. A.; TYUKAVINA, A.; THAU, D.; STEHMAN, S. V.; GOETZ, S. J.; LOVELAND, T. R.; KOMMAREDDY, A.; EGOROV, A.; CHINI, L.; JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G. High-resolution global maps of 21 st-century forest cover change. **Science**, v. 342, p. 850-853, 2013.

HAWKINS R. H. Improved prediction of storm runoff in mountain watershed. Journal of the Irrigation and Drainage Division, **ASCE**, v. 99, p. 519–523, 1973.

HAWKINS, R. H.; HJELMFELT, A. T.; ZEVENBERGEN, A. W. Runoff Probability, Storm Depth, and Curve Numbers. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering-asce**. v. 111, p. 330–340, 1985.

HAWKINS, R. H.; WARD, T. J.; WOODWARD, D. E.; VAN MULLEM, J. A. Curve number hydrology-state of practice. **The ASCE/EWRI publication**, v. 6, 2009.

HUANG, H.; CHEN, Y.; CLINTON, N.; WANG, J.; WANG, X.; LIU, C.; GONG, P.; YANG, J.; BAI, Y; ZHENG, Y.; ZHU, Z. Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine. **Remote sensing of Environment**, v. 202, p. 166-176, 2017.

HUANG, M.; GALLICHAND, J.; DONG, C.; WANG, Z.; SHAO, M. Use of soil moisture data and curve number method for estimating runoff in the Loess Plateau of China. **Hydrological Processes**, v. 21, p. 1471-1481, 2007.

HUANG, M.; GALLICHAND, J.; WANG, Z.; GOULET, M. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slope in the Loess Plateau of China. **Hydrological Processes**. v. 20, p. 579-289, 2006.

HUETE, A. R., A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

HUETE, A.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; LEWEEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, n. 59, p. 440–451, 1997.

HUNTINGTON, J. MCGWIRE, K.; MORTON, C.; SNYDER, K.; PETERSON, S.; ERICKSON, T.; NISWONGER, R.; CARROL, R.; SMITH, G.; ALLEN, R. Assessing the role of climate and resources management on groundwater dependent ecosystem changes in arid environments with the Landsat archive. **Remote sensing of Environment**, v. 185, p. 186-197, 2016.

HYMOWITZ, T. The History of the Soybean. In: JOHNSON, L. A.; WHITE, P. J.; GALLOWAY, R. (Eds.). **Soybeans: Chemistry, Production, Processing, and Utilization**. Urbana, Illinois, USA: AOCS Press., p. 1–31, 2008.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. Indicadores IBGE: **estatística da produção pecuária**.  
<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?id=72380&view=detalhes>.

IRGA - Instituto Rio Grandense do Arroz. **IRGA- Relatório-da-safra-2018- Arroz Irrigado e Soja**. [s.l: s.n.].Disponível em: <<https://irga-admin.rs.gov.br/upload/arquivos/201909/05171808-relatorio-da-safra-2018-19-31-agosto-2019.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2020.

IRMAK, S.; PAYERO, J. O.; VANDEWALLE, B.; REES, J.; ZOUBEK, G. L. **Principles and Operational Characteristics of Watermark Granular Matrix Sensor to Measure Soil Water Status and Its Practical Applications for Irrigation Management in Various Soil Textures**. Biological Systems Engineering: Papers and Publications. Paper 332, v. 783, n. February, p. 1-14, 2014.

JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting Vegetation Indices. **Preventive Veterinary Medicine**, v. 11, p. 185-200, 1991.

JACOBS, J. M.; MYERS, D. A.; WHITFIELD, B. M. Improved rainfall/runoff estimates using remotely sensed soil moisture. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 39, p. 313–324, 2003.

JENSEN, J. R.; EPIPHANIO, J. C. N. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Parêntese Ed., São José dos Campos, SP, 2009.

JIANG, R. **Investigation of Runoff Curve Number Initial Abstraction Ratio**. MS thesis, Watershed Management, University of Arizona, 120 p. 2001.

JIAO, P.; XU, D.; WANG, S.; YU, Y.; HAN, S. Improved SCS-CN Method Based on Storage and Depletion of Antecedent Daily Precipitation. **Water Resources Management**. v. 29, p. 4753–4765, 2015.

JORDAN, C. F. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. **Ecology**. v. 50, 663–666, 1969.

JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, D. P.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V. V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; ZHENGMING WAN, HUETE, A. R., VAN LEEUWEN, W., WOLFE, R. E., GIGLIO, L., MULLER, J., LEWIS, P., BARNESLEY, M. J. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228–1249, 1998.

KALSING, A.; VEDELAGO, A.; LANGE, C. E.; MENEZES, V, G.; TURRA, M. A.; LOPES, F. B.; FERRARI, LIZA, E.; Oportunidade da rotação de culturas para a sustentabilidade do manejo do arroz vermelho. **II Seminário Latino Americano sobre Arroz Vermelho**. Instituto Rio Grandense Do Arroz – IRGA, Porto Alegre, 2013.

KAMBLE, B.; IRMAK, A.; HUBBARD, K.; Estimating Crop Coefficients Using Remote Sensing-Based Vegetation Index. **Remote Sensing**, v. 5, p. 1588–1602, 2013.

KARAM, F.; MASAAD, R.; SFEIR, T.; MOUNZER, O.; ROUPHAEL, Y. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. **Agricultural water management**, 75, 3, 226-244, 2005.

KELLEY, L. C.; EVANS, S. G.; POTTS, M. D. Richer histories for more relevant policies: 42 years of tree cover loss and gain in Southeast Sulawesi, Indonesia. **Global Change Biology**, v. 23, n. 2, p. 830-839, 2017.

KROSS, A.; MCNAIRN, H.; LAPEN, D.; SUNOHARA, M.; CHAMPAGNE, C. Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 34, p. 235–248, 2015.

LIÃO, C.; WANG, J.; DONG, T.; SHANG, J.; LIU, J.; SONG, Y. Using spatio-temporal fusion of Landsat-8 and MODIS data to derive phenology, biomass and yield estimates for corn and soybean. **Science of The Total Environment**, v. 650, n. 2, p. 1707-1721, 2019.

LOBELL, D. B.; THAU, D.; SEIFERT, C.; ENGLE, E.; LITTLE, B. A scalabe satellite based crop yield mapper. **Remote Sensing of Environment**, v. 164, p. 324-333, 2015.

LÓPEZ-URREA, R.; OLALLA, F. M. S.; LÓPEZ-FUSTER, A. M. Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semiarid conditions. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1031-1036, 2009.

MAASS, Matheus Barreto. **Desempenho agronômico de híbridos de milho cultivados num Gleissolo em função de métodos de irrigação**. 2016. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2016.

MACHADO, Ronalton Evandro. **Simulação de escoamento superficial e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 2002.

MAHMOUD, S. H.; GAN, T. Y. Irrigation water management in arid regions of Middle East: Assessing spatio-temporal variation of actual evapotranspiration through remote sensing techniques and meteorological data. **Agricultural Water Management**, v. 212, p. 35-47, 2019.

MAISHELLA, A.; DEWANTORO, B. E. B.; AJI, M. A. P. Correlation Analysis of Urban Development and Land Surface Temperature Using Google Earth Engine in Sleman Regency, Indonesia. IOP Conf. Series: **Earth and Environmental Science**, n.540, 2020.

MARCIAL-PABLO, M.D.J.; ONTIVEROS-CAPURATA, R.E.; JIMÉNEZ-JIMÉNEZ, S.I.; OJEDA-BUSTAMANTE, W. Maize Crop Coefficient Estimation Based on

Spectral Vegetation Indices and Vegetation Cover Fraction Derived from UAV-Based Multispectral Images. **Agronomy**, v. 11, p. 668, 2021.

MARQUELLI, W. A.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO, E. F.; NOGUEIRA, L. C.; SOUZA, V. F. Manejo da água e irrigação. In: SOUSA, V. F.; MARQUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. **Irrigação e fertirrigação em frutíferas e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. cap. 5, p. 157-232. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/55931/1/IRRIGACAO-e-FERTIRRIGACAO-cap5.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2020.

MARTINS, J. D.; RODRIGUES, G. C.; PAREDES, P.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; PEREIRA, L. S. 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.

MARUCCI, R. C.; MENDES, S. M.; WAQUIL, J. M.; ARAÚJO, B. H.; MOREIRA, S. G. Levantamento de Adultos de *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) utilizando armadilhas de feromônio em área comercial de milho Bt. In: **Congresso nacional de milho e sorgo**, 28. Goiânia. Anais. Goiânia: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, p. 490-494, 2010.

MATEOS, L. GONZÁLES-DUGO, M. P.; TESTI, L.; VILLALOBOS, F. J. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. **Agricultural Water management**, v.125, p.81-91, 2013.

MATTOS, M. L. T.; COCCO, K. L. T.; OLIVEIRA, A. C. B. de., VALGAS, R. A.; SCIVITTARO, W. B.; HUNGRIA, M. **Novas estirpes de Bradyrizobium para o incremento da produtividade de genótipos de soja em terras baixas**. – Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2019. 15 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Clima Temperado, ISSN 1678-2518; 330).

MATTOS, M. L. T.; OLIVEIRA, A. C. B. de.; SCIVITTARO, W. B.; GALARZ, L. A.; MALDANER, E. T. **Nodulação e rendimento de soja sob estresse hídrico no agroecossistema terras baixas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 9., 2015, Pelotas, RS. **Anais** [...]. Pelotas: SOSBAI, 2015. PD.

MATZENAUER, R., Estimativa do consumo relativo de água para acultura do milho no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa maria, v. 10, n. 1, p. 35-43, 2002.

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MALUF, J. R. T.; BARNI, N. A.; BUENO, A. C.; DIDONÉ, I. A.; ANJOS, C. S. dos. MACHADO, F. A.; SAMPAIO, M. R. dos., 2002. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAGRO, 105p. (Boletim FEPAGRO, 10).

MEDEIROS, G.A.; ARRUDA, F.B.; SAKAI, E.; FUJIWARS, M. The influence of crop canopy on evapotranspiration and crop coefficient of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Agricultural Water Management**, v. 49, n. 3, p. 211-224, 2001.

MEDEIROS, S. L. P.; WESTPHALEN, S. L.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Relações entre evapotranspiração e rendimento de grãos de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília. v. 6, n. 1, p. 1-10, 1991.

MELLO, C. R. D.; SILVA, A. M. D. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. 1. ed. Lavras: UFLA, 455 p, 2013.

MICHEL, C.; VAZKEN, A.; CHARLES, P. Soil Conservation Service number method: how to mend among soil moisture accounting procedure. **Water Resources Research**, v. 41, p. 1-6, 2005.

MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. Validity and extension of the SCS-CN method for computing infiltration and rainfall-excess rates. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 17, p. 3323–3345, 2004.

MOLDEN, D.; MURRAY-RUST, H.; SAKTHIVADIVEL, R.; MAKIN, I. A water-productivity framework for understanding and action J.W. Kijne, R. Barker, D. Molden (Eds.), **Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement**, IWMI and CABI Publ., Wallingford, p. 1-18, 2003.

MOLDEN, D.; OWEIS, T.; STEDUTO, P.; BINDRABAN, P.; HANJRA, M. A.; KIJNE, J. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 4, 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.

NASH J. E, SUTCLIFFE J. E. Modeling infiltration during steady rain. **Water Resources Research**, v. 9, p. 384–394, 1970.

NEALE, C. M. U.; GELI, H. M. E.; KUSTAS, W. P.; ALFIERI, J. G.; GOWDA, P. H.; EVETT, S. R.; PRUEGER, J. H.; HIPPS, L. E.; DULANEY, W. P.; CHÁVEZ, J. L.; FRENCH, A. N.; HOWELL, T. A. Soil water content estimation using a remote sensing based hybrid evapotranspiration modeling approach. **Advances in Water Resources**, v.50, p.152–161, 2012.

NGUY-ROBERTSON, A.; GITELSON, A.; PENG, Y.; VIÑA, A.; ARKEBAUER, T.; RUNDQUIST, D. Green leaf area index estimation in maize and soybean: combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. **Agronomy Journal**, v. 104, p. 1336-1347, 2012.

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.; QUARTEZANI, W. Z.; NEVES, L. DE. O.; AGUIAR, L. J. G.; FISCHER, G. R.; ROBERTI, D. R.; COSTA, G. S.; COSTA, J. M. N. da. Evapotranspiration Soybean: Comparison between eddy covariance method and the estimate of CROPGRO-Soybean model. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 28– 33, 2016.

OLIVEIRA, Z. B.; CARLESSO, R.; MARTINS, J. D.; KNIES, A. E.; DALLA SANTA, C. Perdas de água por escoamento superficial a partir de diferentes intensidades de chuvas simuladas. **Irriga.**, v. 18, n. 3, p. 415–425, 2013.

PACHECO, L. P.; PIRES, F. R.; MONTEIRO, F.P.; PROCÓPIO, S. O.; ASSIS, R. L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; CARMO, M. L.; PETTER, F. A. Sobressemeadura da soja como técnica para supressão da emergência de plantas daninhas. **Planta Daninha**, v. 27, n. 3, p. 455-463, 2009.

PAÇO, T A.; PAREDES, P.; PEREIRA, L. S.; SILVESTRE, J.; SANTOS, F. L. Crop Coefficients and Transpiration of a Super Intensive Arbequina Olive Orchard using the Dual  $K_c$  Approach and the  $K_{cb}$  Computation with the Fraction of Ground Cover and Height. **Water**, v.11, p.383, 2019.

PARFITT, J. M. B., CONCENÇO, G., SCIVITTARO, W. B., ANDRES, A. **Práticas de manejo de solo em cultivos de sequeiro em terras baixas**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 6 p. (Embrapa Clima Temperado. Circular Técnica, 202), 2019.

PARFITT, J. M. B.; CAMPOS, A. S. de.; CENTENO, A.; ANDRES, A.; MÉLLO-ARAUJO, L. B.; BUENO, M. V.; PINTO, M. A. B.; MARTINS, M. B.; VEBER, P. M.; SCIVITTARO, W. B. **Utilização da Tecnologia Sulco-camalhão na Produção de Soja e Milho em Terras Baixas do Rio Grande do Sul**, v.1, p.1-32. Documentos / Embrapa Clima Temperado, ISSN 1516-8840; 506, 2021.

PARFITT, J. M. B.; PINTO, M. A. B.; TIMM, L. C. **Efeito da Sistematização sobre Atributos Físicos, Químicos e Biológicos de um Solo de Várzea no Rio Grande do Sul**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2014. 33p. (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 189).

PARFITT, J. M. B.; PINTO, M. A. B.; TIMM, L. C. **Efeito da Sistematização sobre Atributos Físicos, Químicos e Biológicos de um Solo de Várzea no Rio Grande do Sul**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 33p. (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 189), 2014.

PARFITT, J. M. B.; WINKLER, A. S.; PINTO, M. A. B.; SILVA, J. T. da.; TIMM, L. C. Irrigação e drenagem para cultivo de soja e milho. In: EMYGDIO, B. M.; ROSA, A. P. S. A.; OLIVEIRA, A. C. B. (Ed.). **Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul**. 1ªEd. Brasília, DF: Embrapa, p. 45-78, 2017.

PARFITT, José Maria Barbat. **Impacto da sistematização sobre atributos físicos, químicos e biológico em solos de várzea**. 2009. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em solos. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas – Brasil, 2009.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: Fundamentos e Práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 183p, 1997.

PEREIRA, L. S. ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v.147, p.4–20, 2015.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G. Novas aproximações aos coeficientes culturais. Engenharia Agrícola, **Jaboticabal**, v.16, n.4, p.118-43, 1997.

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.

PILON, M.; OLIVEIRA, A. C. B. de.; SILVA, J. J. C. da.; BERTAGNOLLI, P. F.; ZÜGE, E. T. E. Desempenho de genótipos de soja cultivados em sistema de camalhão em área de arroz irrigado na região da Campanha/RS. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 41., 2016, Passo Fundo. **Atas e resumos** [...]. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, p. 91-96, 2016.

PINTO, D. G.; FONTANA, D. C.; DALMAGO, G. A.; CUNHA, G. R. DA.; FOCESATO, E.; VICARI, M. B.; GOUVÊA, J. A. DE.; SANTI, A. Temporal dynamics of spectral reflectance and vegetation indices during canola crop cycle in southern Brazil. **Ciência Rural**, v. 47, n. 1, p. 1-8, 2017.

PINTO, L. F. S.; LAUS NETO, J. A.; PAULETTO, E. A. **Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado**. In: Arroz irrigado no sul do Brasil, ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 75-95, 2004.

PINTO, L. F. S.; MIGUEL, P.; PAULETTO, E. A. **Solos de várzeas e terras baixas**. In: EMYGDIO, B. M.; ROSA, A. P. S. A da.; OLIVEIRA, A. C. B. de. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2017, p. 23-43.

POÇAS, I.; PAÇO, T. A.; PAREDES, P.; CUNHA, M.; PEREIRA, L. S. 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.

RADIN, B.; BERGAMASCHI, H.; SANTOS, A. O.; BERGONCI, J. I.; FRANÇA, S. Evapotranspiração da cultura do milho em função da demanda evaporativa atmosférica e do crescimento de plantas. **Pesq. Agrop. Gaúcha**, Porto Alegre, 9, 1-2, 7-16, 2003.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2ª Ed. Barueri, SP: Manole, 2012. 500p.

REYES-GONZÁLEZ, A.; KJAERGAARD, J.; TROOIJEN, T.; HAY, C.; AHIABLAME, L. Assessing Accuracy of Vegetation Index Method to Estimate Actual Evapotranspiration, **Earth Sciences**. V. 7, n. 5, p. 227-235, 2018.

RIBAS, G. G.; STRECK, N. A.; SILVA, S. D. da.; ROCHA, T. S. M.; LANGNER, J. A. Temperatura do solo afetada pela irrigação e por diferentes coberturas. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 35, n. 5, p. 817-828, 2015.

RICHETTI, J.; BOOTE, K. J.; HOOGENBOOM, G.; JUDGE, J.; JOHANN, J. A.; URIBE-OPAZO, M. A. Remotely sensed vegetation index and LAI for parameter determination of the CSM-CROPGRO-Soybean model when *in situ* data are not available. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 79, p. 110-115, 2019.

RITCHIE, H.; ROSER, M. Forests and deforestation. **OurWorldInData**. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/forests-and-deforestation>> [Online Resource], 2021. Acesso em: 12 mar. 2022.

RODRIGUES, G. C.; MARTINS, J. D.; SILVA, F. G. da.; CARLESSO, R.; PEREIRA, L. S. Modelling economic impacts of deficit irrigated maize in Brazil with consideration of different rainfall regimes. **Biosystems Engineering**, v.116, p.97-110, 2013.

ROUSE JR, J.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. 3rd ERTS Symposium, **NASA SP-351**, Washington DC, p. 309-317, 1973.

SAHU, R. K.; MISHRA, S. K.; ELDHO, T. I. Comparative evaluation of SCS-CN-inspired models in applications to classified datasets. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 5, p. 749-756, 2010.

SANGOI, L.; SILVA, P. R. F. da.; ARGENTA, G.; RAMBO, L. **Ecofisiologia da cultura do milho para altos rendimentos**. Lages: Graphel, 87p, 2010.

SANTOS, H. G. dos.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos.; OLIVEIRA, V. A. de.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

SCHÖFFEL, E. R.; SACCOL, A. V.; MANFRON, P. A.; MEDEIROS, S. L. P.; Excesso hídrico sobre os componentes de rendimento da cultura da soja. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 7-12, 2001.

SCIVITTARO, W. B.; SOUSA, R. O.; SILVA, L. S. In: EMYDIO, B. M.; ROSA, A. P. S. A.; OLIVEIRA, A. C. B. (Ed.). Manejo da fertilidade do solo para cultivo de soja e milho. In: EMYGDIO, B. M.; ROSA, A. P. S. A.; OLIVEIRA, A. C. B. (Ed.). **Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul**. 1ªEd. Brasília, DF: Embrapa, p.105-125, 2017.

SCS. **National engineering handbook**. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (SCS), 762p. 1972.

SETZER, J; PORTO, R. L. L. **Tentativa de avaliação do escoamento superficial de acordo com o solo e seu recobrimento vegetal nas condições do Estado de São Paulo**. São Paulo. Boletim Técnico DAEE. v. 2, n. 2, p. 81-104, 1979.

SILVEIRA, D. C.; BONETTI, L. P.; TRAGNAGO, J. L.; NETO, N.; MONTEIRO, V. Caracterização agromofológica de variedades de milho crioulo (*Zea mays* L.) na região noroeste do Rio Grande do Sul. **Rev. Ciência e Tecnologia, Rio Grande do Sul**, v.1, n.1, p. 1-11, 2015.

- SILVEIRA, L.; CHARBONNIER, F.; GENTA, J. L. The antecedent soil moisture condition of the curve number procedure. **Hydrological Sciences Journal**, v. 45, n. 1, p. 3-12, 2000.
- SINGH, R. K.; IRMAK, A. Estimation of Crop Coefficients Using Satellite Remote Sensing. **Journal Of Irrigation And Drainage Engineering**, v. 135, n. 5, p. 597-608, 2009.
- SOSBAI – Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, Arroz irrigado: **recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**. Cachoeirinha, RS: SOSBAI. 209p, 2018.
- SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Bento Gonçalves, RS: SOSBAI, 2014. 192p.
- SPILIOTOPOULOS, M.; LOUKAS, A. Hybrid Methodology for the Estimation of Crop Coefficients Based on Satellite Imagery and Ground-Based Measurements. **Water**, v. 11, p. 1364, 2019.
- SPOHR, R. B.; CARLESSO, R.; GALLÁRRETA, C. G.; PRÉCHAC, F. G.; PETILLO, M. G. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Ciência Rural**, v. 39, p. 74-81, 2009.
- STEENHUIS, T.S.; WINCHELL, M.; ROSSING, J. ZOLLWEG, J. A.; WALTER, M. F. SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 121, n. 3, p. 234–238, 1995.
- STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C. do; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222 p.
- SUBBAIAH, C. C.; SACHS, M. M. Molecular and Cellular Adaptations of maize to flooding stress. **Annals of Botany**, v. 91, n. 2, p. 119-127, 2003.
- SWETNAM, T. L.; YOOL, S. R.; ROY, S.; FALK, D. A. On the Use of Standardized Multi-Tem-poral Indices for Monitoring Disturbance and Ecosystem Moisture Stress across Multiple Earth Observation Systems in the Google Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 13, 1448, 2021.
- THEISEN, G.; SILVA, J. J. C.; SILVA, J. S.; ANDRES, A.; ANTEN, N. P. R.; BASTIAANS, L. The birth of a new cropping system: towards sustainability in the sub-tropical lowland agriculture. **Field Crops Research**. v. 212, p. 82-94, 2017.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Publication in **Climatology**, Laboratory of Climatology, Centerton, v.8, n.1, 1955.
- TIAN, F.; WU, B.; ZENG, H.; ZHANG, X.; XU, J. Efficient Identification of Corn Cultivation Area with Multitemporal Synthetic Aperture Radar and Optical Images in the Google Earth Engine Cloud Platform. **Remote Sensing**, 11, 629, 2019.

TOMAZELLI, L. J.; DILLENBURG, S. R.; VILLWOCK, J. A. Late quaternary geological history of Rio Grande do Sul coastal plain, southern Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 30, p.474-476, 2000.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência Solo**. 26, 305-314, 2002.

USDA - NRCS. **National Engineering Handbook**: Part 630. Washington, USDANRCS, USA, 2004.

USDA – NRCS. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. Hydrologic Soil-Cover Complexes. In:

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign Agricultural Service (FAS). Grain: world markets and trade. United States: USDA/FAS, Jul. 2020. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdon-line/circulars/grain.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2021.

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

VEDELAGO, Anderson. **Adubação para a soja em terras baixas drenadas no Rio Grande do Sul**. Orientador: Ibanor Anghinoni. 2014, 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

VIJI, R.; RAJESH PRASANNA, P.; ILANGOVAN, R. Gis Based SCS - CN Method For Estimating Runoff In Kundahpalam Watershed, Nilgries District, Tamilnadu. **Earth Sciences Research Journal**. v.19, n.1, p.59-64, 2015.

WANDER, A. L.; SOUZA, R. da. S.; RICARDO, T. R.; SILVEIRA, P. M. da. Viabilidade econômica e risco da rotação e consorciação de cultivos para a integração lavoura-pastagem em condições irrigadas no cerrado brasileiro. **Informações Econômicas**, SP, v. 40, n. 5, 2010.

WASHINGTON-ALLEN R. A. W.; RAMSEY R. D.; WEST N. E. Spatiotemporal mapping of the dry season vegetation response of sagebrush steppe. **Community Ecology**, v. 5, n. 1, p. 69-79, 2004.

WEI, Z.; PAREDES, P.; LIU, Y.; CHI, W. W.; PEREIRA, L. S. Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. **Agricultural Water Management**. v.147, n. 1, p.43-53, 2015.

WILLIAMS, L. E.; AYARS, J. E. Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy Agriculture. **Ecosystems & Environment**, v. 132, p. 201-211, 2005.

YANG, C.; EVERITT, J. H.; BRADFORD, J. M.; ESCOBAR, D. E. Mapping grain sorghum growth and yield variations using airborne multispectral digital imagery. Trans. **ASAE**. v. 43, n. 6, p. 1927–1938, 2000.

YOSHIDA, T. **Fundamentals of Rice Crop Science**. Los Banns,Philippines: International Rice Research Institute, 269p, 1981.

ZHANG, Q.; LI, B.; THAU, D.; MOORE, R. Building a better urban Picture: Combining day and night remote sensing imagery. **Remote Sensing**, v. 07, n. 09, p. 1187-11913, 2015.

ZHU, X.; LIU, D. Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. ISPRS J. Photogramm. **Remote Sensing**. v. 102, p. 222–231, 2015.

ZOLFAGHARI, A. A.; MIRZAEI, S.; GORJI, M. Comparison of different models for estimating cumulative infiltration. **International Journal of Soil Science**. v. 7, n. 3, p.108–115, 2012.

## **Apêndices**

**Apêndice A.** Script em *JavaScript* desenvolvido no Google Earth Engine (GEE) para obtenção dos IVs (NDVI, SAVI, EVI e SR), conforme a área de interesse.

```

1 //Passo 1. Importar coleção de imagens
2 //Passo 2. Importar shapefile da área de interesse
3 //Passo 3. Run -> o mapa será redirecionado para a área do
4 shape importado
5 //Passo 4. Desenhar forma -> sobrepondo a geometria do
6 shapefile
7 //Passo 5. Run -> Gráfico de linhas no canto inferior ao mapa
8 deverá ser aberto em outra página, onde poderá ser baixado em
9 CSV, SVG ou PNG
10
11 var app = function(image)
12 {
13 //1. Índices de vegetação
14 //1.1. NDVI
15 var ndvi = image.normalizedDifference(['B5', 'B4']);
16 image = image.addBands(ndvi.rename('NDVI'));
17
18 //1.2. EVI
19 var evi = image.expression(
20   '2.5 * (nir - red) / (nir + 6 * red - 7.5 * blue + 1)',
21   {
22     red: image.select('B4'),
23     nir: image.select('B5'),
24     blue: image.select('B2')
25   });
26 image = image.addBands(evi.rename('EVI'));
27
28 //1.3. SAVI
29 var savi = image.expression(
30   '1.5 * (nir - red) / (nir + red + 0.5)',
31   {
32     red: image.select('B4'),
33     nir: image.select('B5'),
34   });
35 image = image.addBands(savi.rename('SAVI'));
36
37 //1.4. SR
38 var sr = image.expression(
39   'nir / red',
40   {
41     red: image.select('B4'),
42     nir: image.select('B5'),
43   });
44 image = image.addBands(sr.rename('SR'));
45
46 return image;
47 }
48 //2. Mostrar área de interesse
49 print ('Map de area', table)

```

```

50 Map.addLayer(table);
51
52 //2.1. Parcelas principais e buffer
53 var geombuff = geometry.buffer(-20);
54
55 Map.addLayer(geometry, {color:'green'}, 'Border');
56 Map.addLayer(geombuff, {color: 'red'}, 'Buffer');
57 Map.centerObject(table);
58
59 //3. Seleção da coleção de imagens e período
60 var OLI = imageCollection
61     .filterMetadata('CLOUD_COVER', 'less_than', 10)
62     .filterDate('2019-10-01', '2020-05-01') //AAAA-MM-DD
63     .filterBounds(geombuff)
64     .map(app);
65
66 //3.1. Função para mascarar nuvens em imagens do Landsat 8
67 var maskClouds = function(image){
68     var quality = image.select('BQA');
69     var cloud01 = quality.eq(61440);
70     var cloud02 = quality.eq(53248);
71     var cloud03 = quality.eq(28672);
72     var mask = cloud01.or(cloud02).or(cloud03).not();
73     return image.updateMask(mask);
74 };
75 var filteredLandsat = imageCollection
76     .map(maskClouds);
77
78 //4. Rampa de cores
79 var palette = ['FFFFFF', 'CE7E45', 'DF923D', 'F1B555',
80 'FCD163',
81 '99B718', '74A901', '66A000', '529400',
82 '3E8601',
83 '207401', '056201', '004C00', '023B01',
84 '012E01',
85 '011D01', '011301'];
86
87 //5. Gráficos de linha - NDVI, EVI, SAVI e SR
88 var indices = OLI.select('NDVI', 'EVI', 'SAVI', 'SR');
89 var chart = ui.Chart.image.series({
90     imageCollection: indices,
91     region: geombuff,
92     reducer: ee.Reducer.median(),
93     scale: 500
94 }).setSeriesNames(['NDVI', 'EVI', 'SAVI']);
95
96 chart.style().set({
97     position: 'bottom-right',
98     width: '500px',
99     height: '300px'
100 });
101 Map.add(chart);

```

```
102
103 var chartStyle = {
104   title: 'Gráfico de índices de vegetação',
105   hAxis: {
106     title: 'Data',
107     titleTextStyle: {italic: false, bold: true},
108     gridlines: {color: 'FFFFFF'}
109   },
110   vAxis: {
111     title: 'Valores',
112     titleTextStyle: {italic: false, bold: true},
113     gridlines: {color: 'FFFFFF'},
114     format: 'Short',
115     baselineColor: 'FFFFFF'
116   },
117   series: {
118     0: {lineWidth: 1.5, color: 'E37D05'},
119     1: {lineWidth: 1.5, color: '1D6B99'}
120   },
121   chartArea: {backgroundColor: 'EBEBEB'}
122 };
123
124 chart.setOptions(chartStyle);
125
126 //6. Mostrar Layers no Mapa
127 Map.addLayer(OLI.median(), {bands: 'B6,B5,B4'}, 'OLI');
128 Map.addLayer(OLI.median(), {min: 0, max: 1, bands: ['NDVI'],
129 palette: palette}, 'NDVI');
130 Map.addLayer(OLI.median(), {min: 0, max: 1, bands: ['EVI'],
131 palette: palette}, 'EVI');
132 Map.addLayer(OLI.median(), {min: 0, max: 1, bands: ['SAVI'],
133 palette: palette}, 'SAVI');
134 Map.addLayer(OLI.median(), {min: 0, max: 50, bands: ['SR'],
135 palette: palette}, 'SR');
136
137
138
```