Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

BALANÇO HÍDRICO DO SOLO E A NECESSIDADE DE IRRIGAÇÃO DO MILHO EM DIFERENTES REGIÕES DO RIO GRANDE DO SUL

Soil water balance and the need for corn irrigation in different regions of Rio Grande do Sul

Balance hídrico del suelo y necesidad de riego de maíz en diferentes regiones de Rio Grande do Sul

Bruna de Villa
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria, RS
bruna.devilla.5000@gmail.com

Mirta Teresinha Petry
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria, RS
mirta.petry@gmail.com

Juliano Dalcin Martins
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria, RS
julianodalcinmartins@gmail.com

Giane Lavarda Melo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria, RS e professora EBTT – Instituto Federal Catarinense, Camboriú, SC
giane.lavarda@gmail.com

Luciene Kazue Tokura
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Cascavel, PR
lucienetokura@gmail.com

Murilo Brum de Moura
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria, RS
murilodmoura@hotmail.com

Felipe Tonetto
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo – Universidade Federal de Santa Maria, RS
tonetoagronomia@gmail.com

Andressa Fuzer Gonçalves
Programa de Graduação em Agronomia – Universidade Federal de Santa Maria, RS
dessa.fuzer@gmail.com

Resumo: A decisão de quando e quanto irrigar pode ser significativamente melhorada por meio de modelagem, baseada no balanço hídrico do solo. Assim, o objetivo deste estudo foi simular o balanço hídrico, a necessidade de irrigação e o déficit de evapotranspiração atual ($ET_{c\ act}$) do milho nas regiões fisiográficas no RS. O modelo SIMDualKc (Water Balance Simulation – SWB) foi utilizado na simulação do balanço hídrico do solo, para semeaduras em 05/10 e 20/10, entre 2010 e 2022. Os dados de entrada foram: características físico-hídricas do solo, dados meteorológicos, dados da cultura, altura de planta, fração de solo coberta pela cultura em cada estádio, coeficientes de cultura basal, cobertura do solo, além do escoamento e percolação profunda. O SWB indicou diferenças no requerimento hídrico e necessidade de irrigação do milho para as Regiões Fisiográficas do RS, o que se deve aos fatores meteorológicos, de solo e da cultura. O SWB indicou menor requerimento hídrico para semeaduras realizadas em 20/10 na maioria das regiões, com exceção da Serra do Nordeste. Maiores valores de evapotranspiração (ET_c) foram para a região fisiográfica da Serra do Sudeste, ao passo que a maior necessidade de irrigação, foram na Encosta Inferior do Vale do Nordeste. Menores valores de ET_c foram encontrados no sudeste do estado, para as regiões das Grandes Lagoas, Depressão Central e Litoral, que também apresentam as menores necessidades hídricas. O maior déficit de $ET_{c\ act}$ foi de 214 e 204 mm, para as datas de semeadura de 05 e 20/10, respectivamente, na região da Campanha-Bagé.

Palavras-chave: Manejo da irrigação. Consumo hídrico. SIMDualKc.

Abstract: The decision of when and how much to irrigate can be significantly improved through modeling, based on the soil water balance. Thus, the objective of this study was to simulate the water balance, the need for irrigation and the current evapotranspiration deficit ($ET_{c\ act}$) of corn in physiographic regions in RS. The SIMDualKc (Water Balance Simulation – SWB) model was used to simulate the soil water balance alone, for sowings on 10/05 and 10/20, between 2010 and 2022. The input data were physical-water characteristics of the soil, data meteorological, crop data, plant height, fraction of soil covered by the crop at each stage, basal crop coefficients, soil cover, in addition to runoff and deep percolation. The SWB indicates differences in the water requirement and need for corn irrigation for the physiographic Regions of RS, which is due to meteorological, soil and crop factors. The SWB indicates lower water requirements for sowings carried out on 10/20 in most regions, with the exception of Serra do Nordeste. The highest values of evapotranspiration (ET_c) were for the physiographic region of Serra do Sudeste, while the greatest need for irrigation was in the Lower Slope of Vale do Nordeste. Lower ET_c values were found in the southeast of the state, for the Great Lakes, Central Depression and Coastal regions, which also have the lowest water needs. The largest $ET_{c\ act}$ deficit was 214 and 204 mm, for the sowing dates of 05 and 20/10, respectively, in the Campanha-Bagé region.

Keywords: Irrigation management. Water consumption. SIMDualKc.

Resumen: La decisión de cuándo y cuánto regar se puede mejorar significativamente mediante la modelización, basado en el balance hídrico del suelo. Así, el objetivo de este estudio fue simular el balance hídrico, la necesidad de rigo y el déficit de evapotranspiración actual ($ET_{c\ act}$) del maíz en regiones fisiográficas de RS. Se utilizó el modelo SIMDualKc (Simulación del Balance de Agua – SWB) para simular el balance hídrico del suelo, para las siembras del 05/10 y 20/10, entre los años 2010 y 2022. Los datos de entrada fueron: características físico-hídricas del suelo, datos meteorológicos, datos del cultivo, altura de la planta, fracción de suelo cubierta por el cultivo, coeficientes basales del cultivo, cobertura del suelo, además de escorrentía y percolación profunda. El SWB indicó diferencias en el requerimiento de agua y necesidad de riego del maíz para las Regiones Fisiográficas de RS, lo que se debe a factores meteorológicos, edafológicos y de cultivo. La SWB indicó menores requerimientos hídricos para las siembras realizadas el 20/10 en la mayoría de las regiones, con excepción de la Serra do Nordeste. Los mayores valores de evapotranspiración (ET_c) se dieron en la región fisiográfica de la Serra do Sudeste, mientras que la mayor necesidad de riego se produjo en la Vertiente Inferior del Vale do Nordeste. Se encontraron valores de ETc más bajos en el sureste del estado, para las regiones de las Grandes Lagos, la Depresión Central y la Costa, que también tienen las necesidades de agua más bajas. El mayor déficit de la $ET_{c\ act}$ fue de 214 y 204 mm, para las fechas de siembra del 05 y 20/10, respectivamente, en Campaña-Bagé.

Palabras clave: Manejo de riego. Consumo hidrico. SIMDualKc.

Submetido em: 23/10/2023
Aceito para publicação em: 21/02/2024
Publicado em: 29/02/2024

1. INTRODUÇÃO

O milho é o cereal mais produzido no mundo, tendo como principais países produtores os Estados Unidos, China e Brasil (FAOSTAT, 2021). Na safra de 2021/2022, a produção no Brasil foi de 24,4 milhões de toneladas na 1ª safra e de 86 milhões de toneladas na 2ª safra, em uma área total cultivada de aproximadamente 20,5 milhões de hectares. O Rio Grande do Sul (RS) registrou queda da produtividade na safra de 2021/22 da ordem de 32% na 1ª safra, em decorrência de efeitos da estiagem, reduzindo a produção de 4,4 para 2,98 milhões de toneladas (CONAB, 2022).

A frequência de ocorrência, duração e intensidade das secas ou veranicos, são as grandes responsáveis pela variabilidade na produtividade de milho (GIMÉNEZ *et al.*, 2016). A estiagem é um dos mais importantes obstáculos à produção agrícola, sendo que, a magnitude das perdas depende da duração, severidade e estádio fenológico que ocorre. A máxima sensibilidade do milho ao déficit hídrico ocorre na fase da pré-antese até o início de enchimento de grãos (R3). As perdas no rendimento podem variar de 30 a 90%, se o estresse hídrico ocorrer no período vegetativo (30%) ou reprodutivo (90%) (SAH *et al.*, 2020).

Estudos demonstram que o rendimento de uma cultura é baseado no consumo de água, e na evapotranspiração da cultura (ET_c), com uma relação muitas vezes linear (DJAMAN *et al.*, 2018). O consumo de água das plantas depende do estádio de desenvolvimento, solo e condições meteorológicas, sobretudo a demanda evaporativa da atmosfera (PETRY *et al.*, 2021). A quantificação do uso de água de culturas de larga escala é essencial para a agricultura irrigada, principalmente para gerenciamento e planejamento de irrigação (MARTINS *et al.*, 2013). Essa pode ser feita a partir do uso de ferramentas integradas de gestão de recursos hídricos, que incluem a adaptação de sistemas de cultivo e práticas de manejo, bem como o uso eficiente de água da chuva e irrigação (PEREIRA; PAREDES, 2018). Embora uma parte da ET_c, representada pela evaporação do solo (E_s), não faça parte direta na produção, sua estimativa e aplicação é mais fácil que a transpiração (T_c) (KUKAL; IRMAK, 2020).

A ET_c é um parâmetro importante na avaliação hidrológica, ambiental e nos estudos agrícolas, desempenhando papel fundamental na concepção e gestão de projetos e manejo de irrigação (DJAMAN *et al.*, 2018). Deste modo, sabendo-se que o uso da irrigação reduz o risco de quebra e de variabilidade de produtividade entre safras. Além da influência de outros

impactos, como os benefícios socioeconômicos, devido ao aumento da produtividade, com a introdução de outras culturas, e de novos sistemas de produção na região; na geração de empregos diretos e indiretos, pela capacitação da mão-de-obra qualificada, e aos aspectos relacionados a sustentabilidade econômica, social e ambiental (BERNARDO, 2008). Assim, verifica-se a importância de estudos de simulações do balanço hídrico, tanto do requerimento hídrico das culturas (ET_c) como da necessidade de irrigação. Modelos de simulação do balanço hídrico, com termo em inglês conhecido como Water Balance Simulation (SWB), são ferramentas que auxiliam os calendários de irrigação, além de avaliar os fatores meteorológicos na ET_c e o rendimento da cultura (PEREIRA; PAREDES, 2018).

O SIMDualKc é um modelo de SWB de estado estacionário, baseado no princípio de conservação da massa para um determinado intervalo de tempo, sendo menos exigente em dados de entrada e parametrização (ROSA *et al.*, 2012) em relação aos modelos transitórios ou mecanísticos. O SIMDualKc estima a ET_c usando a aproximação dos coeficientes de cultura duais do boletim FAO56 ($K_c=K_{cb}+K_e$), seguindo estudos primários desenvolvidos por Wright (1982), onde o K_{cb} é o coeficiente de cultura basal, representando a transpiração da cultura (T_c), enquanto o K_e representa o efeito da evaporação do solo na ET_c (ALLEN *et al.*, 1998). A utilização do Kc dual pode levar a estimativas mais precisas de ET_c, como descrito por Howell *et al.* (2004). Várias aplicações de SIMDualKc à cultura do milho em diversos locais são apresentados na literatura, como no Brasil (MARTINS *et al.*, 2013), Portugal (PAREDES *et al.*, 2014) e Uruguai (GIMÉNEZ *et al.*, 2016), demonstrando sua eficácia.

As frequentes alterações no regime de precipitações na maioria das regiões produtoras de milho, fazem com que a decisão de quando iniciar as irrigações mude de local para local, como no caso das regiões fisiográficas do RS, que são divisões regionais que apresentam características similares de solo, altitude e composição florística (BOLDRINI, 1997).

Em muitos programas de manejo de irrigação é assumido que as áreas em questão são todas uniformes, e que a resposta das culturas à água é a mesma, independentemente do local. Entretanto, fatores como a densidade de plantas, disponibilidade de água, características do solo, declividade, resíduos culturais, entre outros, podem ser responsáveis por considerável variabilidade nas plantas. Assim, o momento de iniciar uma irrigação deve basear-se na estimativa da umidade do solo, na extração de água nos diferentes estádios, assim como a dinâmica do crescimento/desenvolvimento da cultura em cada local. O fator

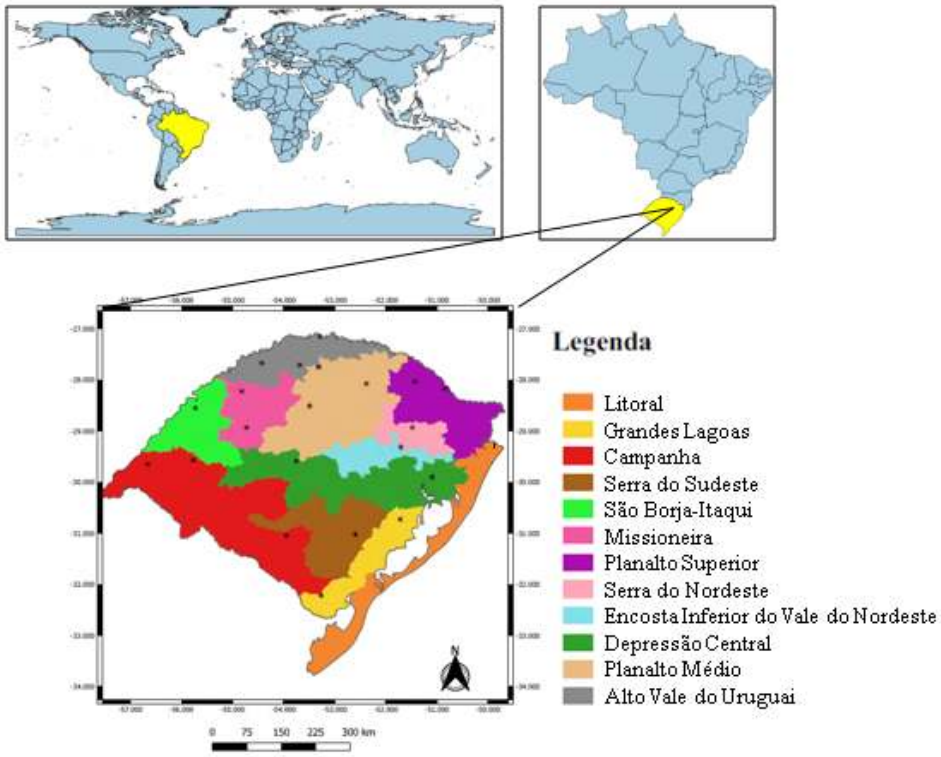
chave para iniciar as irrigações é quando a umidade do solo decresce a ponto de dificultar a extração de água pelas plantas (PETRY *et al.*, 2021), ou seja, quando a fração de água facilmente disponível for esgotada, o que corresponde ao início do estresse na maioria das culturas.

Considerando a necessidade de otimizar o uso da água e do solo em nível regional e local, o presente trabalho teve como objetivo simular o requerimento hídrico, necessidade de irrigação e déficit de ET_c da cultura de milho, em duas datas de semeadura e regiões fisiográficas do RS.

2. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

O estudo foi realizado em 12 regiões do Macrozoneamento Agroecológico e Econômico, no estado do Rio Grande do Sul (RS), cujo detalhamento é apresentado na Figura 1. As nomenclaturas e divisões dos municípios que compõem cada região foram realizadas com base no site: https://www.crisnunessantos.pro.br/dados-municipais, por apresentar de forma clara, a caracterização das delimitações dessas regiões.

Figura 1 - Mapa das regiões do Macrozoneamento do RS e os pontos com estações meteorológicas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

As áreas de estudo se caracterizam por apresentarem temperaturas médias de 17,6°C, com extremos de -4 e 41°C, com frequentes formações de geadas nos meses mais frios do ano. Os climas do estado, de acordo com a classificação de Köppen-Gaiger, são mesotérmicos da classe Cfa ou temperados, da classe Cfb (Tabela 1), com verão ameno, tendo chuvas uniformemente distribuídas, sem estação seca definida e com a temperatura média do mês mais quente inferior a 22ºC (ALVARES *et al.*, 2013).

Tabela 1 – Regiões com seus municípios, estações meteorológicas, altitude e classificação climática.

Regiões fisiográficas	Municípios	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Tipo
Alto Vale do Uruguai	Frederico Westphalen	490	-27,23	-53,25	Cfa
	Santa Rosa	273	-27,53	-54,28	Cfa
	Santo Augusto	490	-27,85	-53,79	Cfa
Campanha	Alegrete	125	-29,42	-55,31	Cfa
	Bagé	241	-31,33	-54,01	Cfa
	Uruguaiana	74	-29,50	-57,08	Cfa
Depressão Central	Porto Alegre	42	-30,05	-51,17	Cfa
	Santa Maria	103	-29,72	-53,72	Cfa
Encosta Inferior do Vale do Nordeste	Teutônia	81	-29,45	-51,82	Cfa
Litoral	Torres	8	-29,35	-49,73	Cfa
Missioneira	Santiago	382	-29,11	-54,53	Cfa
	São Luiz Gonzaga	231	-28,25	-54,57	Cfa
Planalto Médio	Cruz Alta	615	-28,60	-53,67	Cfa
	Palmeira das Missões	452	-27,55	-53,19	Cfa
	Passo Fundo	681	-28,13	-52,24	Cfa
Planalto Superior	Lagoa Vermelha	840	-28,13	-51,30	Cfb
	Vacaria	970	-28,51	-50,88	Cfb
Grandes Lagoas	Camaquã	92	-30,81	-51,83	Cfa
	Jaguarão	31	-32,53	-53,38	Cfa
São Borja-Itaqui	São Borja	80	-28,65	-56,01	Cfa
Serra do Nordeste	Bento Gonçalves	623	-29,16	-51,53	Cfb
Serra do Sudeste	Canguçu	464	-31,24	-52,42	Cfb

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

3. METODOLOGIA

Os dados meteorológicos diários estavam completos e sem falhas e foram coletados do sistema de estações meteorológicas automáticas, pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Sistema Irriga®, para o período de 2010 a 2022 (12 safras), em 22 estações meteorológicas, totalizando 96426 amostras. Os dados incluíram: precipitação (mm), umidade relativa máxima e mínima (RH_{max}; RH_{min}, %), velocidade do vento a 10 m (U_{10}, m s^{-1}) (dados retirados do INEMET), velocidade do vento a 2 m (U_2, m s^{-1}) (dados retirados do Sistema Irriga) temperatura máxima e mínima diária (°C), radiação solar (MJ m^{-2} dia^{-1}) e pressão atmosférica (kPa). A velocidade do vento (U_{10}) foi convertida para 2 m (U_2, m s^{-1}), segundo Allen *et al.* (1998). A evapotranspiração de referência (ET_o,) foi computada usando o método de Penman-Monteith (PM) (ALLEN *et al.*, 1998). O método PM é aceito em todo o mundo e é geralmente visto como o método mais preciso para a estimativa de ET_o (PEREIRA *et al.*, 2015).

3.1. Cultura do milho e modelagem do balanço hídrico (SIMDualKc)

As datas de semeadura foram 05/10 e 20/10 para período de 2010 a 2022, foram estabelecidas de forma a abranger a principal janela de semeadura em todas as regiões do RS. Na simulação, trabalhou-se, com cultivares de milho precoce, que necessitam de menor soma térmica em graus-dia acumulado (GDA) para completar seu ciclo de desenvolvimento (1460º GDA). Os estádios de desenvolvimento da cultura foram estabelecidos de acordo com o GDA, com valores de temperatura do ar ótima de 28ºC, máxima de 32ºC e base de 10ºC (KUKAL; IRMAK, 2016). Para os valores de temperatura do ar que excederam o valor limite superior de temperatura, esses foram reduzidos para o valor da temperatura máxima e, para a temperatura média diária [(Tmax + Tmin)/2] abaixo da temperatura base, o valor GD foi considerado igual a zero (DJAMAN; IRMAK, 2012).

O modelo SIMDualKc, descrito por Rosa *et al.* (2012) foi utilizado para simular o balanço hídrico diário na zona radicular das plantas, evapotranspiração atual ou real da cultura ($ET_{c\ act}$), transpiração máxima (T_c) e atual da cultura ($T_{c\ act}$) e evaporação da água do solo (E_s). Este modelo usa a abordagem do coeficiente dual ($K_c=K_{cb}+K_e$), descrita por Allen *et al.* (1998).

Os valores de K_{cb} utilizados foram definidos de acordo com o estádio de desenvolvimento da cultura, com 0,2 na fase inicial ($K_{c\ ini}$), 1,05 no período intermediário (K_c

$_{med}$) e 0,50 no período final ($K_{c\ fin}$) (PEREIRA *et al.*, 2021). É importante identificar a fenologia da cultura em cada local e ajustar os valores tabulados de K_{cb}, para as durações reais do período de crescimento da cultura (ALLEN *et al.*, 2007). O K_{cb} pode ser estimado a partir das características da cultura, como a fração de cobertura do solo (f_c), índice de área foliar (IAF) e altura de plantas (h) (ALLEN; PEREIRA, 2009), enquanto os valores de K_c podem ser facilmente encontrados na literatura, para uma gama de culturas (PEREIRA *et al.*, 2021). Para duração das fases de desenvolvimento para construção da curva de coeficiente de cultivo (K_c) foi considerada a fenologia da cultura em graus dia acumulado (GDA). O período inicial compreendeu o período entre a semeadura até V3 (milho com 3 folhas desenvolvidas), o período de rápido crescimento entre V3 a V13, (entre 3 e 13 folhas desenvolvidas), o período intermediário entre V13 a R3, (entre 13 folhas desenvolvidas e com grão leitoso) e o período final de R3 até R6 (entre grão leitoso e ponto de maturação fisiológica).

Na Tabela 2 estão apresentados alguns parâmetros de planta, para cada faixa específica da curva de K_c, utilizados no modelo SIMDualKc.

Tabela 2 - Estádio de desenvolvimento do milho, profundidade do sistema radicular (Z_r), altura, fração de cobertura do solo (f_c) e graus dia acumulado (GDA) para entrada no modelo SIMDualKc.

Estádios de desenvolvimento	Z_r (m)	Altura (m)	f_c	GDA (ºC)
Semeadura	0,2	0,05	0,05	-
Desenvolvimento vegetativo (V3)	0,4	0,25	0,20	195
Intermediário (V13)	0,7	1,20	0,90	661
Senescência (R3)	0,7	2,20	0,95	1113
Final (R6)	0,7	1,80	0,75	1460

V3: 3 folhas desenvolvidas; V13: 13 folhas desenvolvidas; R3: grão leitoso; R6: maturação fisiológica; Z_r: profundidade do sistema radicular (0,7 m, também foi considerado para obtenções da Tabela 3).

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Os dados de entrada ao modelo foram: (i) dados físico-hídricos do solo, como capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), necessários para o cálculo do total de água disponível (TAW) (mm) (Tabela 3), porcentagem de areia, silte e argila, além da água prontamente disponível (RAW) (obtida do Sistema Irriga®), lâmina de água facilmente evaporável (REW), total de água evaporável (TEW) e camada evaporável do solo (Z_e) (Tabela 4); (ii) dados meteorológicos, como ET_o (mm dia^{-1}), precipitação (mm), umidade relativa mínima (RH_{min}, %) e velocidade média diária do vento à 2 m de altura (u_2, m s^{-1}); (ii) dados da

cultura, altura das plantas e profundidade efetiva do sistema radicular do milho, que foi de 0,7 m, para fins de simulação para todas as regiões (Tabela 2). A fração de depleção (p) foi de 0.5 (p), para todos os estádios do ciclo, enquanto, os parâmetros de evaporação, a espessura da camada evaporável (Z_e), seguiram as recomendações de Allen *et al.* (1998). Os parâmetros de percolação (a_D e b_D) e escoamento superficial foram ajustados segundo Liu *et al.* (2006). Os dados de coeficientes de cultura de base (K_{cb}), para todos os estádios de desenvolvimento, foram calibrados e validados para a cultura do milho conforme Martins *et al.* (2013) e Giménez *et al.* (2016) (Tabela 3).

Tabela 3 – Parâmetros físicos e hidráulicos dos solos, do banco de dados do Sistema Irriga.

Regiões	Sat.	θ_{CC}	θ_{PMP}	TAW	MAD	Areia	Argila	Silte	n
	($cm^3\ cm^{-3}$)			(mm)			(%)		
Alto Vale do Uruguai	0,50	0,42	0,24	119	69	10,20	63,40	26,3	163
Campanha	0,44	0,32	0,15	119	50	45,60	17,70	36,7	66
Depressão Central	0,42	0,31	0,14	119	52	47,79	22,62	29,6	72
Encosta Inferior do Vale N.	0,42	0,30	0,14	112	57	54,84	14,13	31,0	3
Litoral*	0,40	0,20	0,06	98	51	54,47	20,05	25,5	-
Missioneira	0,52	0,40	0,25	105	59	13,7	50,80	35,5	246
Planalto Médio	0,48	0,42	0,24	105	57	32,11	41,21	26,6	454
Planalto Superior	0,52	0,42	0,25	119	60	8,05	57,38	34,6	7
Grandes Lagoas	0,40	0,30	0,11	133	45	54,47	20,05	25,5	4
São Borja-Itaqui	0,42	0,36	0,20	112	50	25,55	34,10	40,4	100
Serra do Nordeste**	0,42	0,30	0,14	112	57	54,84	14,13	31,1	-
Serra do Sudeste	0,40	0,28	0,11	119	50	60,99	11,81	27,2	4

Sat.: umidade de saturação; θ_{CC}: umidade capacidade de campo; θ_{PMP}: umidade ponto de murcha permanente, TAW: total de água disponível, MAD: fração de depleção máxima permitida; n: número de observações; *dados de grandes lagoas, **dados da Encosta Inferior do Vale do Nordeste.

Fonte: Adaptado de Mantovanelli *et al.* (2021).

Tabela 4 – Valores de K_{cb}, parâmetros de evaporação, escoamento e percolação dos estádios milho.

Parâmetros da cultura	Inicial, padrão	Fontes dos valores iniciais dos parâmetros
$K_{cb\ ini}$	0.2	Martins *et al.* (2013)
$K_{cb\ mid}$	1.05	
$K_{cb\ end}$	0.5	
Fator de depleção (p)	0.50	
Evaporação do solo		
TEW (%)	20	Allen *et al.* (1998)
Z_e (m)	0.1	
Escoamento e Percolação profunda		
a_{DP}	300-470	Liu *et al.* (2006)
b_{DP}	-0.0173	Liu *et al.* (2006)
Escoamento (CN)	65-85	Allen *et al.* (2007)

K_{cb} = coeficientes basais de cultivo inicial ($K_{cb\ ini}$), médio ($K_{cb\ mid}$) e final ($K_{cb\ end}$); Z_e = profundidade da camada evaporável do solo; TEW = esgotamento inicial na camada evaporável; TAW = depleção inicial nas demais camadas do solo; CN = número da curva; a_{DP} e b_{DP} = parâmetros da equação de percolação.

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

O modelo SIMDualKc utiliza um ajuste ao $K_{cb\text{-}mid}$ (intermediário) às condições meteorológicas, a partir de dados de sombreamento do solo pela cultura (f_c e IAF) e h, conforme Allen *et al.* (1998) (Equação 1):

(1)

$$K_{cb\,full} = F_r\left(\min\left(1.0+0.2h,1.20\right)+\left[0.04\left(u_2-2\right)-0.004\left(RH_{\min}-45\right)\right]\left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}\right)$$

Onde o $K_{cb\ full}$ representa o limite superior do $K_{cb\ mid}$ para condições em que o solo se encontra totalmente sombreado (IAF>3.0, neste estudo: V13), sendo calculado pela altura de plantas durante o período intermediário (h, m), da velocidade média diária do vento (u_2, m s^{-1}), e a média diária da umidade relativa mínima (RH_{min}, %) durante o período vegetativo.

A equação 1 sugere que o máximo valor do $K_{cb\ full}$ antes do ajuste seria 1.20. O efeito da altura de plantas é considerado pela soma de $1+k_h$, recomendando-se o valor de k_h = 0.2 para o milho (PEREIRA *et al.*, 2021). O valor de F_r é um ajuste empírico (F_r=1.0) se a vegetação exibir maior ajustamento estomático à transpiração daquele considerado típico para plantas anuais crescendo em ótima disponibilidade de água.

Com relação à irrigação, considerou-se no 1º momento, um sistema pivô central, onde a fração de solo umedecida pelos eventos de irrigação (fw), foi de 100%, aplicando-se lâminas líquidas de 8, 12 e 15 mm, respectivamente, no estádio inicial de desenvolvimento (até V3),

desenvolvimento vegetativo (de V3 a V13), intermediário (V13 a R3) e final do ciclo de desenvolvimento (R3 a R6), para uma eficiência de 85%. As irrigações foram iniciadas de forma a evitar estresse, permitindo um esgotamento máximo de água (MAD) de 45 a 70% valor de p (MAD≤p). O valor de p define o total de água facilmente disponível (RAW=TAW.p), ou seja, a lâmina de água facilmente disponível foi sempre superior ao MAD, de forma que, as irrigações eram iniciadas quando o esgotamento de água atingia entre 30 a 36 mm no período intermediário. Entre a semeadura até o início do período intermediário, valores progressivos de MAD foram utilizados, conforme a profundidade efetiva do sistema radicular (Tabela 2).

No 2º momento, as simulações foram realizadas sem considerar a irrigação, considerando os mesmos dados de entrada de solo e cultura no modelo SIMDualKc.

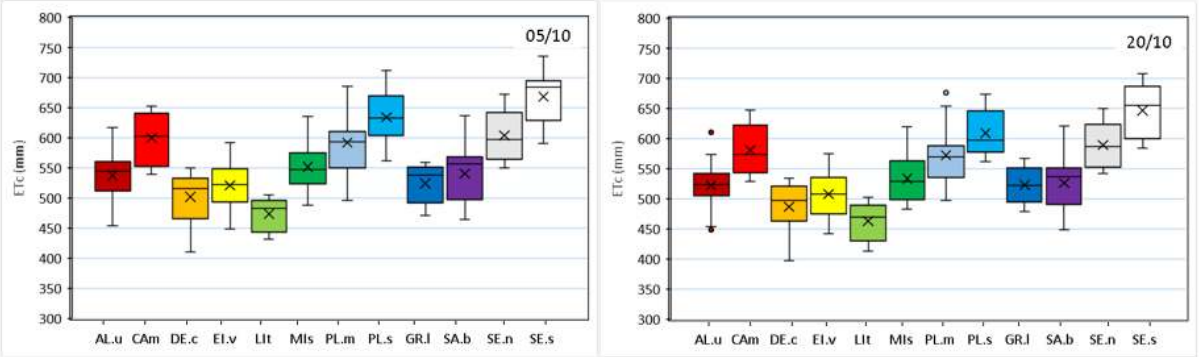
4. DESENVOLVIMENTO

4.1. Evapotranspiração da cultura (ET_c)

A Figura 2 apresenta a variabilidade interquartílica da ET_c para o ciclo de desenvolvimento da cultura entre as regiões, nas duas datas de semeadura.

Menores valores de ET_c foram encontrados para a Depressão Central, com valores de 410 mm e 397 mm, para as datas de semeadura de 05/10 e 20/10, no ano de 2018 (Figura 2), assim como aos valores encontrados por Daniel *et al.* (2020), que encontraram valores de ET_c acumulada para o milho de 422 mm (milho consorciado com crotalária em 2018 no estado do Mato Grosso), o que se deve pelo fato dessa região fisiográfica apresentarem os menores valores de ET_o, o que está relacionado com a diferença climática entre as áreas em estudo. Os valores de ET_c são superiores aos encontrados por Barbieri *et al.* (2020), com valores de 336 mm (sem cobertura vegetal) e 350 mm (com cobertura vegetal) no estado do Mato Grosso. Köpp *et al.* (2015) estimaram a ET_c do milho para os municípios de Bagé, Uruguaiana (Campanha) e Santa Maria (Depressão Central), RS, com semeaduras de setembro até dezembro, e observaram um valor médio de 654 mm ao longo do ciclo de desenvolvimento do milho, apresentando maior ET_c para semeaduras no mês de outubro.

Figura 2 – Evapotranspiração da cultura do milho em duas datas de semeadura e 12 regiões do RS.



AL.u: Alto Vale do Uruguai; CAm: Campanha; DE.c: Depressão Central; EI.v: Encosta Inferior; LIT: Litoral; MIs: Missioneira; PL.m: Planalto Médio; PL.s: Planalto Superior; GR.l: Grandes Lagoas; SA.b: São Borja-Itaqui; SE.n: Serra do Nordeste; SE.s: Serra do Sudeste.

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

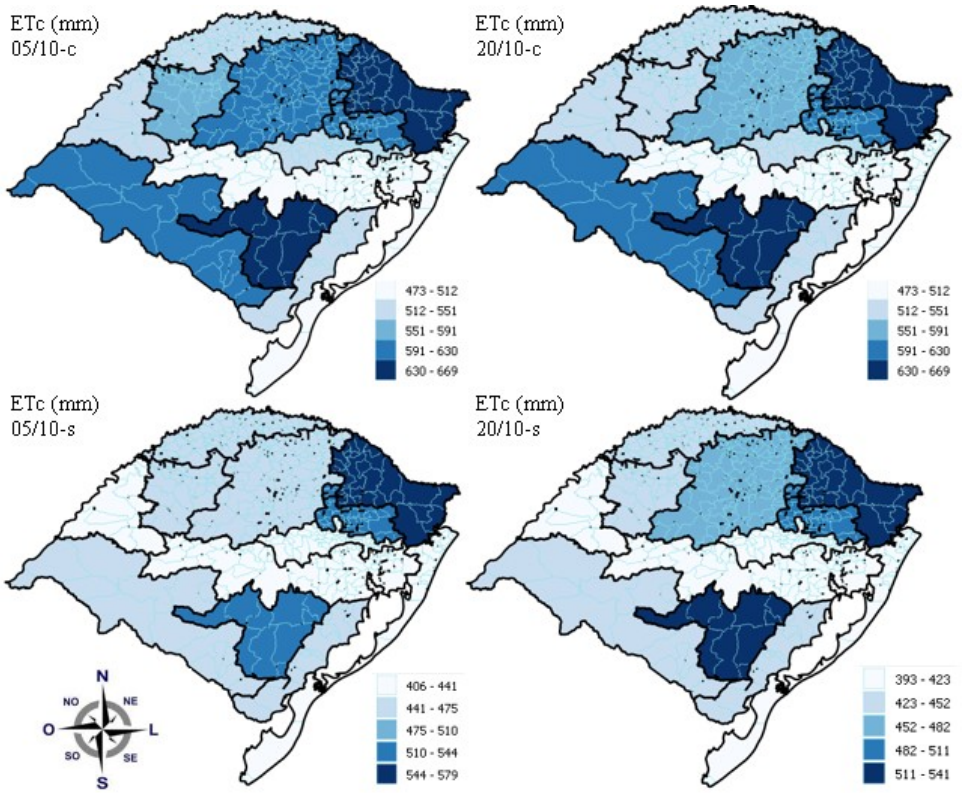
Para as semeaduras de outubro no RS, observa-se um comportamento semelhante na ET_c (Figura 2), com menor variação para o Litoral. Essa maior variação para as demais regiões pode ser devido à grande variação na ET_o, que refletem diretamente na variável analisada.

Analisando-se a região do Alto Vale do Uruguai, observa-se que, embora aparente pouca amplitude interquartil, teve extremos de máximos e mínimos em ambas as datas de semeadura, com pontos discrepantes (*outliers*) podendo ser observados na data de semeadura de 20/10, o que pode ser justificado pela diferença entre os valores anuais trabalhados, com anos de 449 mm (2018) a 611 mm (2011), o que pode ser justificado pela ocorrência de anos de El Niño e La Niña, que como descrito por Bammesberger *et al.* (2022), evidencia os momentos de La Niña Moderado para estes dois anos em estudo (efeitos causados pelos fenômenos que alteram a distribuição de temperatura da superfície da água do Oceano Pacífico, evidenciando deste modo não somente a diferença entre as regiões, mas também a diferença abrangida dentro da própria série histórica dos dados trabalhados).

Analisando-se os valores médios de ET_c (Tabela 5), para cada um dos munícipios analisados dentro das regiões, verifica-se que na data 05/10, o menor valor de $ET_{c\ act}$ foi para Grandes Lagoas-Camaquã, com 463 mm e o maior valor para Planalto Superior-Lagoa Vermelha, com 686 mm, resultado esse podendo ser justificado pela variação de valores de ET_o entre esses municípios (555 e 797 mm, respectivamente), devido a diferença entre as características climáticas de cada região em estudo, como a radiação e velocidade do vento. A evapotranspiração é uma das variáveis mais importantes no ciclo hidrológico e no balanço

hídrico. Menores valores de ET_o, coincidem com períodos de maior ocorrência de chuvas, devido à diminuição da radiação solar, resultando em menor demanda hídrica atmosférica (SILVA, 2015). Na data 20/10, a ET_c, apresentou o menor valor para o Litoral-Torres, com 463 mm e o maior valor para o Planalto Superior-Lagoa Vermelha com 686 mm, de modo que a ET_c sofre influência das variáveis meteorológicas, do solo, das características intrínsecas de cada cultura e de acordo com as fases fenológicas da planta (SOUZA *et al.*, 2015). Entre as regiões verificou-se que a ET_c apresentou maiores valores no Nordeste com destaque na região do Planalto Superior-Lagoa Vermelha e no sudoeste do estado, com ênfase em Campanha-Bagé. E as regiões das Grandes Lagoas, Depressão Central e Litoral (sudeste), a ET_c e necessidades hídricas tiveram os menores valores (Figura 3).

Figura 3 – Mapa da espacialização da ETc do milho, simulado com o modelo SIMDualKc para semeaduras em 05/10 e 20/10, com irrigação e sem irrigação, para o período compreendido entre 2010/11 a 2021/22, para as diferentes regiões fisiográficas do RS.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

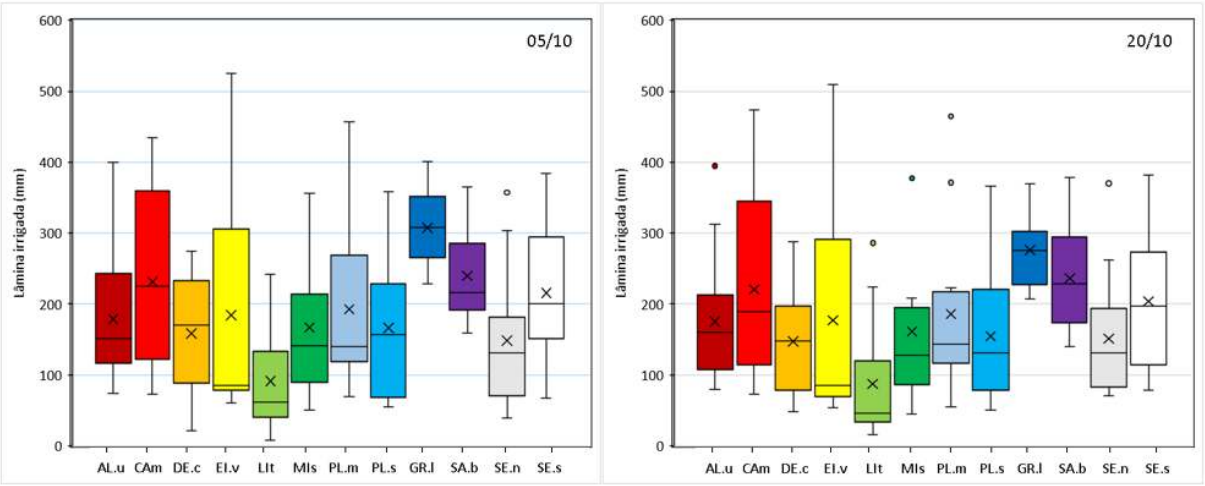
Nas datas de semeadura avaliadas, a maior ET_c (Figura 2) foi para a região da Encosta Inferior do Vale do Nordeste, com valores de 525 mm (2020) e 510 mm (2020), para as

semeaduras de 05/10 e 20/10, respectivamente, demonstrando assim, a diferença entre precipitação nas regiões, o que se deve as características meteorológicas, podendo ter como possível explicação os valores de precipitação, que foram de 545 mm (05/10) e de 482 mm (20/10).

4.2. Lâmina total de irrigação requerida

Na Figura 4 observam-se os boxplot de lâmina total de irrigação requerida para duas datas de semeadura, em 12 regiões do Macrozoneamento Agroecológico e Econômico do RS.

Figura 4 – Lâmina total de irrigação requerida em duas datas de semeadura e 12 regiões do RS.



AL.u: Alto Vale do Uruguai; CAm: Campanha; DE.c: Depressão Central; EI.v: Encosta Inferior; LIT: Litoral; MIs: Missioneira; PL.m: Planalto Médio; PL.s: Planalto Superior; GR.l: Grandes Lagoas; SA.b: São Borja-Itaqui; SE.n: Serra do Nordeste; SE.s: Serra do Sudeste.

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Com relação ao requerimento hídrico, observa-se que, em todos os anos, época de semeadura e/ou região, houve a necessidade de suplementar o requerimento hídrico do milho, via irrigação (Figura 4), evidenciando-se, a importância em investimentos voltados à irrigação. Os menores valores de lâmina total irrigada foram encontrados para a região do Litoral, com valores de 8 mm (05/10, em 2018) e 16 mm (20/10, em 2016 e 2017), o que pode ser justificado por apresentar um dos menores valores de ET_o. Deste modo, enfatiza-se que o suprimento hídrico foi necessário para todas as regiões, sobretudo na fase crítica da cultura, resulta em maiores produtividades (MARTINS *et al.*, 2013).

Quanto às lâminas totais de irrigações simuladas no ciclo de desenvolvimento da

cultura (Figura 4), as regiões que apresentaram maior homogeneidade entre os dados foram: Grandes Lagoas, São Borja-Itaqui e Litoral. Para a região das Grandes Lagos, a média foi igual a mediana, demonstrando uma boa representatividade dos dados, com valores de extremos de máximos e mínimos próximos aos quartis, indicando homogeneidade dos dados. Por outro lado, maior heterogeneidade foi encontrada para a lâmina total irrigada na região da Encosta Inferior e da Campanha, com as maiores faixas de intervalos interquartis, o que pode ser justificado pela heterogeneidade dos valores de precipitação.

Ressaltando-se, que uma vez que o suprimento hídrico da cultura for menor que o requerimento, grande redução no rendimento pode ocorrer, principalmente quando o stress hídrico ocorre em períodos de floração e enchimento de grãos (SAH *et al.*, 2020).

Observa-se que os maiores valores de lâmina de irrigação simulada foram encontrados na data de 05/10 (Figura 4). Para Zhang *et al.* (2019), a época de semeadura é uma importante prática de manejo no milho, sobretudo para os cultivos de sequeiro, buscando manter uma produção sustentável. E nos cultivos irrigados, a adequação da época de semeadura acarretam melhor gestão dos recursos hídricos pois, quando o período crítico coincide com a máxima demanda hídrica, maior número e maior lâmina de irrigação serão necessárias.

4.3. Componentes do SWB

Na Tabela 5 observam-se os componentes do SWB para semeaduras de 05/10 e 20/10.

Analisando-se os valores apresentados quanto às lâminas de irrigação (valores médios dos 12 anos dentro das regiões), a necessidade de suplementação hídrica, na data 05/10, foi necessária em todas as regiões, variando de 91 mm (Litoral-Torres), para 293 mm (Campanha-Bagé) de água durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho, com uma diferença de ~70%, o que pode ser explicado pelos valores de ET_o, de modo que Campanha (Bagé), apresentou valor de ET_o de 757 mm, em que a irrigação assume um papel determinante para a produtividade da cultura do milho, buscando sanar as exigências hídricas, principalmente no período compreendido entre a emissão do pendão até a maturação (BIOSEMENTES 2014).

A demanda hídrica necessária para a obtenção de boas produtividades na cultura do milho é de 400 a 800 mm (USDA, 2016). Segundo Mendoza-Pérez *et al.* (2016), a falta de água nos estádios fenológicos de floração e enchimento de grãos, reflete negativamente na

produtividade. Para a data 20/10, a necessidade de suplementação hídrica variou de 87 mm (Litoral-Torres) para 281 mm (Campanha-Bagé) durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho, com uma diferença de 69,04%. E, comparando-se as duas datas de semeadura verifica-se que a necessidade de irrigação foi menor para a data 20/10 em praticamente todos os casos, exceto para Planalto Superior-Vacaria e Serra do Sudeste-Bento Gonçalves.

Tabela 5 – Componentes do balanço hídrico do milho simulado com o modelo SIMDualKc para semeaduras em 05/10 e 20/10, nos períodos de 2010/11 a 2021/22, nas diferentes regiões do RS.

Regiões	05/10-20/10							
	Prec. real	RO	DP.	NBWR	ET_c	T_c	E_s	I
	(mm)							
Alto Vale do Uruguai (S.R)	681-608*	163-127	189-161	0,40-0,36	521-506	434-423	87-83	196-188
Alto Vale do Uruguai (F.W)	750-691	157-129	215-192	0,41-0,38	523-512	434-425	89-87	150-148
Alto Vale do Uruguai (S.A)	688-620	147-115	159-139	0,35-0,29	568-549	474-433	94-91	190-189
Campanha (A)	761-757	131-133	228-239	0,39-0,41	534-559	451-432	83-78	157-140
Campanha (B)	556-494	68-54	112-75	0,21-0,17	660-640	563-549	97-92	293-281
Campanha (U)	568-530	61-54	138-118	0,24-0,22	606-593	520-508	86-86	243-242
Depressão Central (P.A)	489-430	44-22	88-61	0,21-0,14	492-481	419-405	73-76	145-145
Depressão Central (S.M)	685-601	98-63	207-172	0,36-0,31	511-492	429-414	82-78	157-149
Encosta Inferior (TE)	545-482	43-25	152-119	0,27-0,22	521-508	442-430	78-77	184-177
Litoral (TO)	573-551	42-36	110-103	0,23-0,22	473-463	405-393	69-69	91-87
Missioneira (S)	753-685	177-142	170-144	0,38-0,34	565-542	473-455	91-87	167-158
Missioneira (S.L.G)	695-645	167-149	144-155	0,36-0,38	539-525	455-445	84-81	166-164
Planalto Médio (P.F)	661-600	110-84	118-89	0,28-0,23	583-560	482-467	102-93	155-137
Planalto Médio (C.A)	705-655	149-129	140-125	0,32-0,30	609-588	511-495	99-93	204-202
Planalto Médio (P.M)	597-551	131-108	95-81	0,28-0,25	583-569	489-478	94-91	219-218
Planalto Superior (L.V)	759-697	103-86	140-116	0,26-0,23	686-658	574-554	112-104	178-172
Planalto Superior (V)	798-708	124-92	168-146	0,31-0,29	626-596	512-488	114-108	128-133
Grandes Lagoas (J)	509-448	22-14	136-98	0,21-0,16	585-568	495-482	90-86	242-233
Grandes Lagoas (C)	542-548	30-31	155-139	0,28-0,25	463-478	392-404	71-74	128-118
São Borja-Itaqui (S.B)	584-547	94-92	195-172	0,35-0,34	541-526	457-443	84-83	239-236
Serra do Nordeste (B.G)	674-643	35-25	162-158	0,24-0,23	604-589	510-493	94-96	148-151
Serra do Sudeste (CAN)	706-638	44-31	192-149	0,26-0,21	669-647	565-553	103-94	216-204

*O primeiro valor corresponde a data 05/10 e o segundo a 20/10, S.R: Santa Rosa; F.W: Frederico Westphalen; S.A: Santo Augusto; A: Alegrete; B: Bagé; U: Uruguaiana; P.A: Porto Alegre; S.M: Santa Maria; TE: Teutônia; T: Torres; S: Santiago; S.L.G: São Luiz Gonzaga; PF: Passo Fundo; C.A: Cruz Alta; P M: Palmeira das Missões; LV: Lagoa Vermelha; V: Vacaria; ; J: Jaguarão; C: Camaquã; S.B: São Borja-Itaqui; B.G: Bento Gonçalves; CAN: Canguçu; Prec. real: precipitação real; RO.: escoamento superficial; DP: percolação; ET_o: evapotranspiração de referência; ET_c: evapotranspiração da cultura; T_c: transpiração da cultura; E_s: evaporação do solo; Irri.: irrigações; NBWR: água não-benéfica (razão RO+DP/P+I).

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A diferença para a suplementação hídrica variou no número de irrigações de 7 (Litoral-

Torres) a 22 (Campanha-Bagé), demonstrando que ocorre maior diferença entre as regiões, do que entre as diferentes datas de semeadura. Observando-se que a necessidade de irrigação se faz presente para todos os casos, seja comparando diferentes datas de semeaduras ou diferentes regiões, demonstrando a importância de estudos voltados para esta área, onde o déficit hídrico causado pela má distribuição das chuvas é um dos principais fatores que limitam a produtividade de grãos na cultura do milho (BEN *et al*., 2019).

Assim observa-se que o conhecimento dos valores da necessidade hídrica e melhores datas de semeadura são importantes para os produtores quando se trabalha com irrigação. Enfatizando-se, que estimativas precisas da água da cultura são importantes para a gestão e planejamento da água na agricultura (DJAMAN *et al.*, 2018).

Na Tabela 5, observa-se, na data 05/10, que a precipitação variou de 489 mm (Depressão Central-Porto Alegre) a 798 mm (Planalto Superior-Vacaria), demonstrando a variabilidade espacial da área de estudo, com diferença de 38,73%. Esses valores estão de acordo com os encontrados por Da Silva (2019) que, avaliando médias mensais e anuais para o estado do RS, encontrou maiores valores para Planalto e os menores para a Depressão Central. De uma precipitação de 798 mm, teve-se 15,54% em escoamento superficial e 21,05% de perdas por drenagem. Um dos fatores geográficos mais importantes à ocorrência e distribuição espacial da precipitação é a altitude, onde a diferença da mesma favorece os movimentos convectivos do vento, refletindo-se no aumento das precipitações (DA SILVA, 2019). Para Nied *et al.* (2005), a distribuição da precipitação durante o período de cultivo de milho no Rio Grande do Sul tem ocorrido de maneira muito irregular ao longo dos últimos anos, com períodos de elevados volumes e outros de escassez hídrica, o que caracteriza insegurança na produção de milho na safra, igualmente ao cultivado na safrinha. Na data 20/10, pode-se observar que a precipitação real, variou de 430 mm (Depressão Central-Porto Alegre) a 757 mm (Campanha-Alegrete) (diferença de 43,20%), demonstrando a heterogeneidade entre as regiões, que segundo Estefanel *et al.* (2009), devem-se as diferenças de altitude e os movimentos convectivos do vento causados pela orografia, os quais influenciam a quantidade de precipitação pluviométrica.

Na região da Campanha-Alegrete, para a precipitação de 757mm teve-se 17,57% de seu valor em escoamento superficial e 31,57% de percolação de água no solo. Para os valores de escoamento superficial, um dos fatores que interferem é a intensidade da precipitação, de

modo que, se ocorrer alta intensidade, o que o solo não conseguir reter, se torna escoamento superficial. O RO é largamente influenciado pelas características da superfície do solo, da capacidade de infiltração, da intensidade das precipitações e relevo. Londero *et al.* (2021) observaram significativas perdas de água e solo em bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul, mesmo com 30 anos de plantio direto consolidado, atribuindo essas perdas a variabilidade espacial da topografia. Hörbe *et al.* (2021) igualmente detectaram elevadas perdas por RO em duas pequenas BH, com e sem terraceamento e declividade variando de 5-13%. Panachuki *et al.* (2011) também encontraram maiores perdas de água por escoamento em função da maior declividade do solo. Perdas por RO de 67, 45 e 27% do total de precipitação foram reportados pro Carlesso *et al.* (2009), para um Argissolo, Quartzarênico típico e Latossolo, respectivamente, usando um simulador de chuva. Os autores também reportaram rápida redução no tempo de início do escoamento com o aumento da intensidade da precipitação, independentemente do tipo, quantidade do resíduo cultural sobre a superfície do solo.

A DP, por outro lado, é fortemente influenciada pela umidade do solo anterior à precipitação e pela magnitude e características da precipitação e da irrigação, conforme observado por Lai *et al.* (2016). Embora seja um importante componente nos lenções freáticos e abastecimento de bases de rios, a DP é indesejável do ponto de vista da agricultura, pois ocorre após a saturação do solo, a qual pode causar estresse por encharcamento (HESS *et al.*, 2018). Fatores como a presença de um horizonte sub-superficial de baixa permeabilidade e o consumo sazonal de água (ET_c) podem afetar a DP, ou seja, nas fases de maior consumo hídrico, uma menor DP é esperada, excetuando eventos extremos de precipitação (acima da capacidade de armazenamento máximo de água do solo).

Na Tabela 6 são apresentados os componentes do SWB para semeaduras realizadas em 05/10 e 20/10, sem irrigação.

Todos os valores de RO, DP, $ET_{c\ act}$, $T_{c\ act}$ e E_s foram menores ou iguais aos valores quando simulado com a irrigação (Tabela 5). O déficit de evapotranspiração foi maior (214 e 204 mm), para as datas de 05 e 20/05, na região da Campanha-Bagé. A $ET_{c\ act}$ é influenciada pela demanda evaporativa da atmosfera, a cultura e seu estádio de desenvolvimento, além de fatores como o preparo do solo, a presença ou não de “mulch” e a frequência e intensidade dos eventos de molhamento do solo. Em alguns casos, a E_s pode ser a maior componente da ET_c. Em plantas cultivadas, sejam culturas de lavoura ou de pomar, a Es é maior na fase inicial

dos cultivos, movida pela demanda evaporativa da atmosfera + umidade do solo. Portanto, a Es é um componente do balanço hídrico que é indesejável, pois não incrementa a produção (AGAM *et al.*, 2012). Nas fases do ciclo em que a vegetação cobre totalmente o solo, pode-se assumir que a ET_c e similar a T_c, sobretudo quando a superfície não estiver úmida, mas o solo tiver suficiente umidade para suprir a necessidade de água da cultura.

Tabela 6 – Componentes do balanço hídrico do milho simulado com SIMDualKc para semeaduras em 05/10 e 20/10, nos períodos de 2010/11 a 2021/22, nas diferentes regiões do RS, sem irrigação.

Regiões	05/10-20/10						
	Prec. real	RO	DP.	NBWR	$ET_{c\,act}$	T	E_s
	(mm)						
Alto Vale do Uruguai (S.R)	681-608*	154-119	142-118	0,40-0,39	411-394	343-349	68-63
Alto Vale do Uruguai (F.W)	750-691	148-121	164-144	0,42-0,38	458-445	379-369	79-76
Alto Vale do Uruguai (S.A)	688-620	135-113	95-103	0,33-0,35	462-450	384-377	78-74
Campanha (A)	761-757	127-113	200-192	0,43-0,40	448-432	381-369	68-62
Campanha (B)	556-494	62-50	92-53	0,28-0,21	446-436	379-376	67-60
Campanha (U)	568-530	61-53	106-88	0,29-0,27	436-433	382-377	61-55
Depressão Central (P.A)	489-430	43-20	65-35	0,22-0,13	408-406	349-344	59-61
Depressão Central (S.M)	685-601	98-63	179-148	0,40-0,35	440-421	369-358	70-63
Encosta Inferior (TE)	545-482	43-25	127-87	0,31-0,23	414-393	352-334	62-59
Litoral (TO)	573-551	41-35	86-83	0,22-0,21	427-416	368-358	59-58
Missioneira. (S)	753-685	170-136	138-116	0,41-0,37	463-446	386-375	76-71
Missioneira (S.L.G)	695-645	160-142	108-85	0,39-0,35	440-430	368-362	72-67
Planalto Médio (P.F)	661-600	107-78	88-65	0,29-0,24	483-477	473-462	89-82
Planalto Médio (C.A)	705-655	146-127	103-84	0,35-0,32	471-457	389-383	83-74
Planalto Médio (P.M)	597-551	123-100	67-51	0,32-0,27	439-429	368-364	71-65
Planalto Superior (L.V)	759-697	94-78	97-70	0,25-0,21	584-555	485-466	98-88
Planalto Superior (V)	798-708	120-82	140-105	0,33-0,26	573-527	470-433	103-94
Grandes Lagoas (J)	509-448	21-14	95-56	0,23-0,16	437-429	373-371	65-58
Grandes Lagoas (C)	542-548	30-31	110-84	0,26-0,21	447-439	377-375	70-64
São Borja-Itaqui (S.B)	584-547	90-86	130-113	0,38-0,36	406-393	343-333	63-60
Serra do Nordeste (B.G)	674-643	35-25	124-114	0,24-0,22	514-503	434-428	80-75
Serra do Sudeste (CAN)	706-638	43-31	134-94	0,25-0,20	542-531	461-457	81-74

*Primeiro valor corresponde a data 05/10 e segundo a 20/10; S.R: Santa Rosa; F.W: Frederico Westphalen; S.A: Santo Augusto; A: Alegrete; B: Bagé; U: Uruguaiana; P.A: Porto Alegre; S.M: Santa Maria; TE: Teutônia; T: Torres; S: Santiago; S.L.G: São Luiz Gonzaga; PF: Passo Fundo; C.A: Cruz Alta; P.M: Palmeira das Missões; L.V: Lagoa Vermelha; V: Vacaria; J: Jaguarão; C: Camaquã; S.B: São Borja-Itaqui; B.G: Bento Gonçalves; CAN: Canguçu; Prec. real: precipitação real; RO: escoamento superficial; DP: percolação; ET_o: evapotranspiração de referência; ET_c: evapotranspiração da cultura; T_c: transpiração da cultura; E_s: evaporação do solo; Irri.: irrigações; NBWR: água não-benéfica (razão RO+DP/P+I).

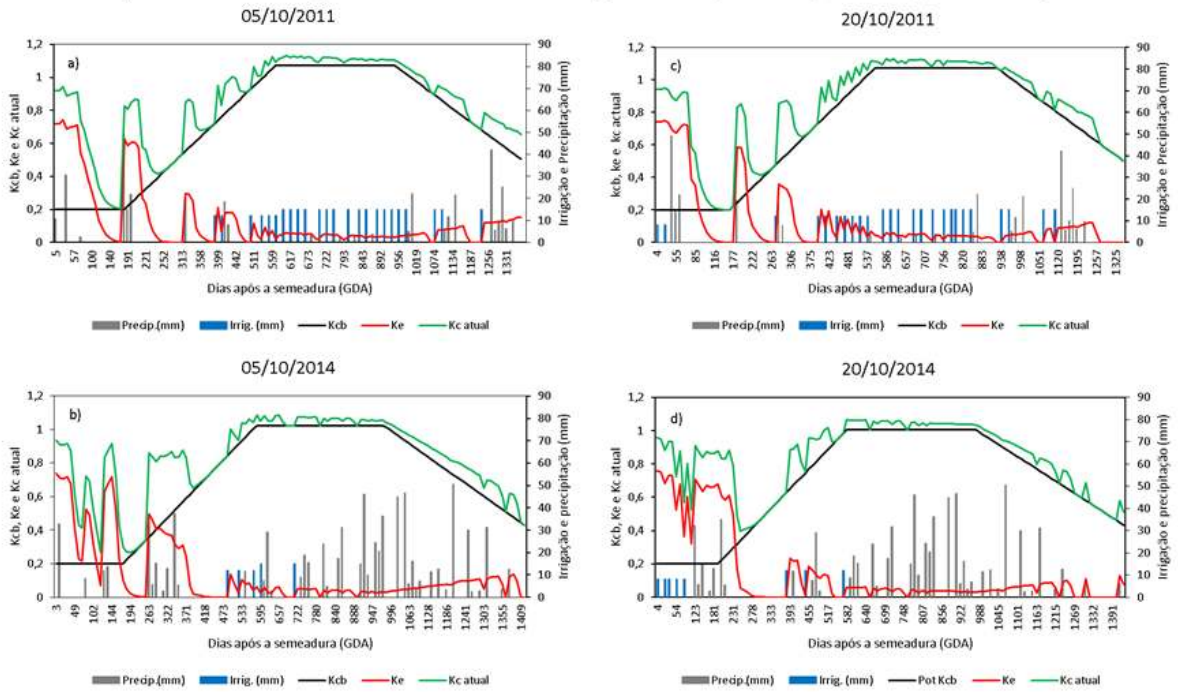
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Em condições de ótima disponibilidade de água, a $ET_{c\,act}$, é igual a ET_c. A redução na ET_c se dá quando a depleção de água na zona radicular for superar o limite estabelecido como (RAW=TAW.p), demonstrando assim que para estas datas simuladas a cultura sofreu estresse hídrico o que reflete diretamente na produtividade da cultura. Para Zhang *et al.* (2019), a época de semeadura é uma importante prática de manejo no milho, sobretudo para os cultivos de sequeiro, visando manter uma produção sustentável.

4.4. Coeficientes da cultura

Na Figura 5, observa-se a variação do coeficiente de cultura basal (K_{cb}), coeficiente de evaporação (K_e), coeficiente de cultura atual ($K_{c\,act}$), precipitação pluvial e irrigações aplicados ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do milho, para as datas de 05/10 e 20/10, para um ano seco (2011) e muito úmido (2014) (anos estes, escolhidos por meio da maior e menor soma de precipitação, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura).

Figura 5 – Variação do coeficiente de cultura basal (K_{cb}), coeficiente de evaporação (K_e), coeficiente de cultura ajustado ($K_{c\,atual}$), precipitação pluvial (Precip.) e irrigação (Irri.) ao longo do ciclo de desenvolvimento do milho na data 05/10 e 20/10 para 2011 (ano seco) e 2014 (ano úmido).



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Observa-se valores maiores de K_e na fase inicial e picos desse coeficiente logo após os

eventos de chuva e/irrigação, evidenciando que esse depende da presença do *mulch* (considerou-se o fator de redução da evaporação de 50%), do sombreamento do solo pela cultura, da disponibilidade de energia (representada pela ET_o) e da umidade do solo. O $K_{c\ act}$, por sua vez, que representa o efeito combinado da transpiração e evaporação em um único coeficiente, foi superior ao K_{cb} potencial durante todo o ciclo da cultura, em resposta às irrigações aplicadas e chuvas ocorridas no período. Observa-se maior necessidade de irrigação no ano de 2011 (ano seco), sobretudo a partir da pré-floração (630 GDA) até o final do ciclo.

Analisando a necessidade de irrigação, para uma mesma época de semeadura, porém em anos distintos, observa-se um maior requerimento hídrico no ano de 2011 (ano seco), com valores de 342 mm (05/10) (Figura 5-a) e 337 mm (20/10) (Figura 4-c), em relação ao ano de 2014 (ano chuvoso), com valores de 12 mm (05/10) (Figura 4-b) e 76 mm (20/10) (Figura 5-d). Essa variação nas irrigações é atribuída aos anos de El-Nino ou La Niña (BERLATO *et al.*, 2005), ou devido a variabilidade interanual das precipitações pluviais (BERGAMASCHI *et al.*, 2013).

Na Tabela 7, são apresentados os valores de $K_{c\ act}$ médio, no estádio inicial, de desenvolvimento, intermediário e final do ciclo da cultura do milho, para semeaduras em 05/10 e 20/10, em 2011 (ano seco) e 2014 (ano chuvoso), para as diferentes regiões do RS.

Tabela 7 – Valores de $K_{c\ act}$, no estádio inicial, médio e final do ciclo do milho, nas semeaduras em 05/10 e 20/10, no período entre 2010/11 a 2021/22, para as diferentes regiões do RS.

Regiões	**05/10-20/10**		
	$K_{c\ ini}$	**$K_{c\ mid}$**	**$K_{c\ end}$**
Alto Vale do Uruguai	0,75	1,07	0,81
Campanha	0,71	1,09	0,82
Depressão Central	0,73	1,05	0,79
Encosta Inferior	0,72	1,07	0,80
Litoral	0,68	1,02	0,72
Missioneira	0,75	1,08	0,81
Planalto Médio	0,75	1,08	0,83
Planalto Superior	0,71	1,07	0,89
Grandes Lagoas	0,72	1,05	0,78
São Borja-Itaqui- São Borja	0,75	1,08	0,82
Serra do Nordeste	0,69	1,06	0,80
Serra do Sudeste	0,69	1,10	0,84
Média	**0,72**	**1,06**	**0,81**

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Os maiores valores de $K_{c\ act}$, foram encontrados, para Alto Vale do Uruguai, Missioneira,

Planalto Médio e São Borja (região noroeste do estado) e os menores valores encontrados para Litoral, Serra do Nordeste e Serra do Sudeste.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A simulação do balanço hídrico indicou a necessidade de irrigação em todas as datas de semeadura, com valores menores na maioria das regiões na data de semeadura de 20/10.

Os maiores valores de ET_c foram encontrados para a região da Serra do Sudeste. E maiores valores de irrigação durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho foram encontrados na região da Encosta Inferior do vale do Nordeste.

Os menores valores de ET_c foram encontrados na região sudeste do estado para as regiões das Grandes Lagoas, Depressão Centra e Litoral.

E para a simulação sem irrigação suplementar, todos os valores de RO, DP, $ET_{c\ act}$, T_c e E_s foram menores ou iguais aos valores quando simulado com a irrigação.

A $ET_{c\ act}$ teve déficit máximo de 214 mm (05/10) e 204 mm (20/10) na região da Campanha-Bagé.

Sugere-se para futuros trabalhos, avaliar as regiões fisiográficas de outros estados do Brasil. Bem como, avaliar outras culturas, como soja, trigo, arroz e feijão. Ou até mesmo trabalhar com uma série histórica maior, para que se possa consolidar ainda mais as informações do presente estudo. Outra frente de trabalho seria fazer o levantamento energético e de consumo hídrico, caso as demais área do estado também fossem irrigadas.

REFERÊNCIAS

AGAM, Nurit *et al.* Evaporative loss from irrigated interrows in a highly advective semi-arid agricultural area. **Advances in Water Resources**, Nebraska, v. 50, p. 20-30, 2012.

ALLEN, Richard Glen; PEREIRA, Luís Santos. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. **Irrigation Science**, Califórnia, v. 28, p. 1734, 2009.

ALLEN, Richard Glen *et al.* **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 308 p.

ALLEN, Richard Glen *et al.* **Design and operation of farm irrigation systems**. 2. ed. St. Joseph: ASABE, p. 208-288, 2007.

ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

BAMMESBERGER, Andressa *et al.* Variabilidade sazonal da precipitação pluviométrica da bacia hidrográfica dos rios Vacacaí e Vacacaí-mirim. **Irriga**, Botucatu, v. 27, n. 3, p. 506-523, 2022.

BARBIERI, João Danilo *et al.* Cobertura do solo, evapotranspiração e produtividade do milho safrinha. **Cultura Agronômica**, Ilha Solteira, SP, v. 29, n. 1, p. 76-91, 2020.

BEN, Luis Humberto Bahú *et al.* Agronomic performance of maize hybrids under supplemental irrigation depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 23, n. 7, p. 524-531, 2019.

BERLATO, Moacir Antonio; FARENZENA, Homero; FONTANA, Denise Cybis. Associação entre El Niño oscilação Sul e a produtividade de milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, p. 423-432, 2005.

BERGAMASCHI, Homero *et al.* **Boletins Agrometeorológicos da Estação Experimental Agronômica da UFRGS: Série Histórica 1970 – 2013**. Porto Alegre: Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia da UFRGS, 2013.

BERNARDO, Salassier. Impacto ambiental da irrigação no Brasil. 2008. Disponível em: https://www2.feis.unesp.br/irrigacao/imagens/winotec_2008/winotec2008_palestras/Impacto_ambiental_da_irrigacao_no_Brasil_Salassier_Bernardo_winotec2008.pdf. Acesso em: 10 fev. 2024.

BIOSEMENTES. **Irrigação de milho por gotejamento. Produtividade maximizada – 2014**. Disponível em: https://www.biosementes.com.br/loja/news/7/Irrigacao-de-Milho-por gotejamento.-Produtividade-maximizada.html. Acesso em: 18 mar. 2023.

BOLDRINI, Lisi Lob. Campos do Rio Grande do Sul: Caracterização Fisiográfica e Problemática Ocupacional. **Boletim do Instituto de Biociências**, n. 56, p. 1-39, 1997.

CARLESSO, Reimar; PETRY, Mirta Teresinha; TROIS, Célio. **The use of a meteorological station network to provide crop water requirement information for irrigation management**. *In*: Li, D., Zhao, C. Computer and Computing Technologies in Agriculture II, 1. CCTA 2008. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Boston: Springer, p. 19-27, 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO-CONAB. **Sexto levantamento - SAFRA 2020/21**, Conab: Brasília, v. 9, n. 6, 2022.

DA SILVA, Régis Leandro Lopes *et al.* Variação geográfica da precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-mirim, RS. **Disciplinarum Scientia**. Série: Naturais e Tecnológicas, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 41-51, 2019.

DANIEL, Diego Fernando *et al.* Evapotranspiration and yield of off-season maize and crotalaria intercropped. **Research, Society and Development**, São Paulo, v. 9, n. 8, p, 1-27, 2020.

DJAMAN, Koffi *et al.* Sum of hourly vs. daily Penman-Monteith grass-reference evapotranspiration under semiarid and arid climate. **Irrigation and Drainage Systems Engineering**, Milan, v. 7, n. 1, p. 1-6, 2018.

DJAMAN, Koffi; IRMAK, Suat. Soil water extraction patterns and crop, irrigation, and evapotranspiration water use efficiency of maize under full and limited irrigation and rainfed settings. **Trans. ASABE**, p. 1223-1238, 2012.

ESTEFANEL, Valduino *et al.* Distribuição probabilística dos totais mensais e anuais de precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, RS. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2009, Belo Horizonte. **Anais** [...]. Belo Horizonte: UFMG, 2009. Disponível em: www.sbagro.org/files/biblioteca/256.pd

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2021. Disponível em: http://www.fao.org/faostat.

GIMÉNEZ, Luis *et al.* Predicting Maize Transpiration, Water Use and Productivity for Developing Improved Supplemental Irrigation Schedules in Western Uruguay to Cope with Climate Variability, **Water**, Suíça, v. 8, p. 309, 2016.

HESS, Laura J. T. *et al.* Rainfall Intensification Enhances Deep Percolation and Soil Water Content in Tilled and No-Till Cropping Systems of the US Midwest. **Advancing Critical Zone Science**, Michigan, p. 1-12, 2018.

HÖRBE, Adriana Maria Coimbra *et al.* Advances in geochemical footprint, iron speciation, and Pb isotopes in the tropical regolith of north-northwestern Amazonia, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, México, v. 106, p. 103096, 2021.

HOWELL, Terry A. *et al*. Evapotranspiration of full, deficit irrigated, and dry land cotton on the Northern Texas High Plains. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, EUA, v. 130, n. 4, p. 277-285, 2004.

KÖPP, Luciana Marini *et al.* Simulação da necessidade hídrica e estimativa de produtividade para cultura de milho em municípios do estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 14, n. 2, p. 235-247, 2015.

KUKAL, Meetpal Singh; IRMAK, Suat. Long-term patterns of air temperatures, daily temperature range, precipitation, grass-reference evapotranspiration and aridity index in the USA Great Plains: Part I. Spatial trends. **Journal of Hydrology**, EUA, v. 542, p. 953-977, 2016.

KUKAL, Meetpal Singh; IRMAK, Suat. Light interactions, use and efficiency in four row crops under optimal growth conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, Canada, v. 284, p. 107887, 2020.

LAI, Xiaoming *et al.* Responses of soil water percolation to dynamic interactions among rainfall, antecedent moisture and season in a forest site. **Journal of Hydrology**, EUA, v. 540, p. 565-573, 2016.

LIU, Yu; PEREIRA, Luis Santos FERNANDO, R. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. **Agricultural Water Management**, Países Baixos, v. 84, n. 1, p. 27-40, 2006.

LONDERO, Ana Lúcia *et al.* Quantifying the impact of no-till on runoff in southern Brazil at hillslope and catchment scales. **Hydrol Process**, Alemanha, v. 35, e14094, 2021.

MANTOVANELLI, Bruno Campos *et al.* Geostatistical interpolation based ternary diagrams or estimating water retention properties in soils in the Center-South regions of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Holanda, v. 209, p. 10973, 2021.

MARTINS, Juliano. Dalcin *et al*. Dual crop coefficients for maize in Southern Brazil: Model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil. **Biosystems Engineering**, EUA, v. 15, n. 3, p. 291-310, 2013.

MENDOZA, Pérez Cândido *et al*. Response of surface-irrigated corn to regulated deficit irrigation. **Ingeniería Agrícola y Biosistemas**, Chapingo, v. 3, n. 1, p. 29-40, 2016.

NIED, Astor Henrique *et al*. Épocas de semeadura do milho com menor risco de ocorrência de deficiência hídrica no município de Santa Maria, RS Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 5, p. 995-1002, 2005.

PANACHUKI, Elói *et al.* Soil and water loss and water infiltration in red latosol under different management systems. **Revista Bras. de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1777-1786, 2011.

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

PEREIRA, Luis Santos; PAREDES, Paula. **Modelling water use on farms**. *In*: Water management for sustainable agriculture. Portugal: Burleigh Dodds Science Publishing, v. 18, p. 44-58, 2018.

PEREIRA, Luis Santos *et al*. Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height: Practical application to vegetable, field and fruit crops with focus on parameterization. **Agricultural Water Management**, Países Baixos, v. 252, p. 106663, 2021.

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

PETRY, Mirta Teresinha; MARTINS, Juliano Dalcin; CARLESSO, Reimar. Irrigação de milho: foco em altas produtividades. Conteúdo Técnico biomatrix, p. 18-28, 2021.

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

SAH, Rameswar Prasad *et al*. Impact of water deficit stress in maize: Phenology and yield components. **Scientific Reports**, Reino Unido, v. 10, p. 1-15, 2020.

SILVA, Samuel. **Evapotranspiração e análise econômica de irrigação em cana-de-açúcar**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SOUZA, Luciana Sandra Bastos *et al.* Requerimento hídrico e coeficiente de cultura do milho e feijão-caupi em sistemas exclusivo e consorciado. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 4, p. 151-160, 2015.

USDA. Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. **Safra Mundial de Milho 2016/17** - 11º Levantamento do USDA. Informativo 2016.

WRIGHT, James L. New Evapotranspiration Crop Coefficients. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, Viena, v. 108, 1982.

ZHANG, Liyuan *et al.* Maize canopy temperature extracted from UAV thermal and RGB imagery and its application in water stress monitoring. **Frontiers in Plant Science**, Suíça, v. 10, p. 1270, 2019.