



Modelagem do crescimento do girassol sob diferentes épocas de semeadura, regimes hídricos e solos

Luis Henrique Loose^{1(*)}, Jocélia Rosa da Silva², Arno Bernardo Heldwein², Mateus Possebon Bortoluzzi³, Mateus Leonardi² e Sidinei Zwick Radons⁴

¹Instituto Federal Farroupilha - Campus Santo Ângelo. Rodovia RS 218, Km 5, Indúbras, CEP 98806-700 Santo Ângelo, RS. E-mail: luis.loose@iffarroupilha.edu.br

²Universidade Federal de Santa Maria. Av. Roraima, 1000, CEP 97.105-000 Santa Maria, RS. E-mails: joceliarosa.s@gmail.com, heldweinab@smail.ufsm.br e mateus-leonardi@hotmail.com

³Universidade de Passo Fundo. E-mail: mateusbortoluzzi@hotmail.com

⁴Universidade Federal da Fronteira Sul. E-mail: radons@uffs.edu.br

(*) Autor para correspondência.

INFORMAÇÕES

História do artigo:

Recebido em 2 de setembro de 2020

Aceito em 9 de junho de 2021

Termos para indexação:

Helianthus annuus L.

necessidade hídrica

Sul do Brasil

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi modelar o crescimento do girassol sob diferentes épocas de semeadura, condições de disponibilidade hídrica e solos. O experimento foi conduzido em Santa Maria/RS (Argissolo) e Panambi/RS (Latossolo), sob três condições hídricas (déficit, excesso e controle) e semeadura no início de setembro e janeiro. Para determinar a condição hídrica do solo realizou-se o balanço hídrico sequencial diário. As plantas foram coletadas em quatro estádios de desenvolvimento fenológico: V10, R2, R6 e R8. Para analisar o crescimento do girassol utilizaram-se: a taxa de crescimento da cultura, taxa de crescimento relativo, taxa de assimilação líquida, taxa de crescimento foliar relativo, duração da área foliar, razão da área foliar e área foliar específica. Além disso, uma modelagem do crescimento em matéria seca de cada parte da planta e da profundidade do sistema radicular. Nossos dados mostraram que o déficit hídrico foi a condição que mais afetou o crescimento do girassol, seguido pelo excesso hídrico. O modelo de crescimento pico gaussiano, de maneira geral, foi o que melhor se adequou a matéria seca e a profundidade de raízes do girassol, apresentando bom ajuste aos dados medidos e podendo ser utilizados para diferentes locais com boa precisão para as condições nas quais foi desenvolvido este trabalho.

© 2021 SBAgro. Todos os direitos reservados.

Introdução

O potencial produtivo de uma planta é reduzido com a intensidade da ocorrência de uma condição adversa, causada por fator abiótico ou biótico. O fator abiótico que

mais afeta o crescimento e a produtividade das plantas é a disponibilidade hídrica do solo (Anjum et al., 2011; Taiz et al., 2017). A análise de crescimento das plantas é essencial para entender como as plantas respondem a essas diferentes condições (Lucchesi, 1984). Da mesma forma, a

modelagem é uma ferramenta importante para simular e estimar o crescimento, desenvolvimento e produtividade vegetal em diferentes condições ambientais (Kleinpaul et al., 2019).

A modelagem surgiu nos anos 1960 e evoluiu com o advento tecnológico dos computadores (McMaster et al., 2011). A gama de modelos matemáticos vai de simples a complexos. Dependendo da finalidade, tanto os modelos mais simples quanto os mais complexos podem ser utilizados sem prejuízo dos resultados. Porém, para modelar o crescimento em biomassa e produtividade são necessárias uma série de variáveis relacionadas às plantas, levando a uma complexidade maior nesses modelos (Sinclair & Seligman, 1996).

As variáveis geradas na análise de crescimento, como a taxa de crescimento da cultura e a taxa de assimilação líquida, podem integrar a modelagem das culturas. Segundo Connor & Fereres (1999) nos modelos complexos, as variáveis de análise de crescimento entram no terceiro setor, relacionado à produção de biomassa seca, que contempla a fotossíntese, a eficiência do uso da radiação solar, o índice de área foliar, a massa foliar específica e a partição de massa seca, além da duração da área foliar ativa (Urchei et al., 2000). O primeiro refere-se ao desenvolvimento fenológico da cultura (soma térmica, número de folhas e dossel) e o segundo à umidade do solo (água no solo, profundidade de raízes, evapotranspiração, absorção de água, suscetibilidade ao estresse hídrico).

Atualmente os esforços de pesquisadores estão focados em melhorar os modelos de simulações de culturas pela incorporação de respostas ao estresse hídrico, interpretação do tempo térmico (Xiangxiang et al., 2013) e a partição de fotoassimilados entre as partes da planta (Ahmed et al., 2020). Na cultura do girassol, apesar de haver alguns modelos matemáticos de desenvolvimento (Casadebaig et al., 2011), faltam informações sobre o crescimento e partição de matéria seca que contemplam as condições de déficit e principalmente sobre excesso hídrico.

O objetivo deste trabalho foi modelar o crescimento do girassol sob diferentes épocas de semeadura, condições de disponibilidade hídrica e solos.

Material e Métodos

Os experimentos foram realizados em dois locais do Rio Grande do Sul: 1) Santa Maria (latitude 29° 43' 23"S, longitude 53° 43' 15"W e altitude 95 m), e 2) Panambi (latitude 28° 16' 02"S, longitude 53° 34' 43"W e altitude 419 m). O clima das duas regiões é classificado como do tipo Cfa (subtropical úmido sem estação seca definida) (Kuinchtner; Buriol, 2011). O solo da área experimental de Santa Maria é o Argissolo Vermelho Distrófico arênico e

de Panambi é o Latossolo Vermelho Distroférico típico (Streck et al., 2008).

Em ambas as áreas experimentais o solo foi corrigido com calagem e adubação de N-P₂O₅-K₂O previamente à semeadura de aveia, cultura que antecedeu ao girassol. A semeadura do girassol foi realizada de forma direta na época de Safra e da Safrinha em Santa Maria (06/09/2013, 06/01/2014, 06/01/2015) e Panambi (07/09/2013, 07/01/2014). O híbrido de girassol Helio 250 foi semeado no espaçamento de 0,50 m entre linhas e 0,45 m entre plantas, com população aproximada de 45 mil plantas ha⁻¹ após o desbaste. A adubação constou de 300 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O (5-20-20) e 30 kg ha⁻¹ de Bórxaz realizada na semeadura e 100 kg ha⁻¹ de N, na forma de ureia aplicada em cobertura no estádio V10 (10 folhas desenvolvidas). A calagem e a adubação foram realizadas com base na análise química do solo. Os demais tratamentos culturais foram realizados conforme indicações técnicas (Leite et al., 2007).

O experimento foi um trifatorial (3x2x2): três disponibilidades hídricas (controle, déficit e excesso hídrico), duas épocas de semeadura (Safra e Safrinha) e dois diferentes solos (Argissolo e Latossolo). O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, com disposição em faixas, com parcelas de 22 m². Os tratamentos de disponibilidade hídrica foram: déficit hídrico, com irrigação abaixo da necessidade da cultura, mantendo-se o armazenamento (Armaz) entre 40 e 60% da capacidade de armazenamento de água disponível (CAD); controle, com a melhor condição de disponibilidade hídrica às plantas, mantendo-se o Armaz entre 75 e 100% da CAD, evitando excessos e déficits hídricos; e excesso hídrico, mantendo-se o Armaz acima de 90% da CAD com irrigações feitas até o ponto detectado como de saturação do solo, que foi até 167 mm no Argissolo e de 144 mm no Latossolo. Esses níveis de condição hídrica foram utilizados com base nos resultados obtidos para a cultura do milho (Bergonci et al., 2001).

A aplicação dos tratamentos iniciou no estádio V6 (6 folhas desenvolvidas), restringindo-se a entrada de chuvas no tratamento de déficit hídrico e aplicando irrigações excessivas na área sob tratamento de excesso hídrico. O tratamento de déficit hídrico contou com uma estrutura que permitiu a colocação e retirada completa do filme plástico de polietileno de baixa densidade (PEBD), imediatamente antes e após cada chuva, respectivamente, evitando que a umidade no solo se elevasse acima de 60% da CAD. No entorno da área foram feitas valas de 0,3 m de profundidade permitindo a melhor drenagem da área.

A irrigação foi feita por tubos gotejadores instalados na entrelinha de plantas. A umidade do solo foi quantificada pelo balanço hídrico sequencial (BHS) em escala diária (Pereira, 2005). A variação do aprofundamento radicular ao longo do ciclo foi considerada para a quantificação diária da CAD, sendo calculada conforme Dourado Neto et

al. (1999), considerando-se 0,10 m a profundidade inicial e de 0,60 m desde a antese até ao final do ciclo (Maldaner, 2012).

Foram obtidos dados meteorológicos das estações meteorológicas automáticas do INMET, localizadas em Santa Maria e em Cruz Alta (mais próxima a Panambi) e os dados de precipitação pluvial foram medidos nas áreas experimentais. Cruz alta está distanciada a aproximadamente 50 km de Panambi, não afetando significativamente a precisão das análises, pois a área coberta por uma estação meteorológica abrange um raio de até 100km ao seu redor (WMO, 2010). A evapotranspiração de referência foi calculada pelo método de Penman-Monteith com ajuste da razão de radiação proposta por Righi et al. (2015) e a evapotranspiração máxima da cultura (ETc) foi calculada conforme Allen et al. (2006) utilizando os coeficientes de cultura propostos por Matzenauer et al. (1999) com valores de kc inicial de 0,43, médio de 1,15 e final de 0,37.

As amostragens de plantas foram realizadas ao longo do ciclo, nos estádios de dez folhas expandidas (V10), alongamento do broto floral (R2), final da floração (R6) e final do enchimento de grãos (R8). Foram quantificadas as massas de matéria seca total (MST), matéria seca de folhas (MSF), matéria seca de caule (MSC), matéria seca de capítulo (MSCap), matéria seca de raízes (MSR) e área foliar (AF) determinada pelo método proposto por Maldaner et al. (2009). A análise de crescimento foi realizada em função da soma térmica para o girassol.

Quantificaram-se a taxa de crescimento da cultura (TCC), a taxa de crescimento relativo (TCR), a taxa de assimilação líquida (TAL), a taxa de crescimento foliar relativo (TCFR), a duração da área foliar (DAF), a razão da área foliar (RAF) e a área foliar específica (AFE). As equações para cálculo das variáveis de análise de crescimento encontram-se em Lucchesi (1984). Os resultados foram avaliados por análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

A modelagem do crescimento foi realizada para as variáveis MST, MSF, MSC, MSCap, MSR e para a profundidade do sistema radicular (PSR). A massa de matéria seca não apresentou diferença significativa entre os solos, apenas entre épocas de semeadura e condição hídrica, sendo utilizados valores médios dos dois solos para a modelagem. A PSR apresentou diferença inclusive para os solos e, portanto, foi desdobrada entre solos e épocas de semeadura. Os modelos foram gerados com a média de oito plantas por tratamento de condição hídrica em cada local e em cada época, e testados com a média de outras oito plantas. Foram testados modelos lineares, quadráticos, cúbicos, potenciais, sigmoides e de pico gaussiano, sendo utilizados aqueles que mais se ajustaram aos valores observados em função da soma térmica. Para o teste dos

modelos foram utilizadas as estatísticas do erro absoluto médio (EAM), da raiz do quadrado médio do erro (RQME) e do índice d de Willmott.

Resultados e Discussão

Os resultados da análise de crescimento do girassol mostraram não haver diferença entre os dois solos, mas entre épocas de semeadura e entre os tratamentos de disponibilidade hídrica (Tabela 1). Entre os estádios EM e V10 praticamente pode-se comprovar a homogeneidade até o início da aplicação dos tratamentos de disponibilidade hídrica, pois estes começaram a ser aplicados a partir do estádio fenológico V6.

A TCC representa a quantidade de matéria seca total acumulada por área e por unidade de tempo (Lucchesi, 1984), nesse caso por tempo térmico ($^{\circ}\text{C dia}$). A TCC durante a Safra foi maior no tratamento controle, diferindo do déficit e do excesso hídrico nos subperíodos V10 - R2 e R2 - R6. No subperíodo R6 - R8 houve redução na TCC. Na Safrinha os resultados foram semelhantes, com a diferença de que no subperíodo R6 - R8 a TCC foi negativa nos tratamentos controle e excesso hídrico. Resultado semelhante foi encontrado para a aveia preta (Schuch et al., 2000) e para a batata (Barcelos et al., 2007). No subperíodo de R6 - R8 a senescência foliar foi acentuada, sendo mais acelerada na Safrinha do que na Safra, levando a TCC a ser negativa.

A TCR representa o aumento na quantidade de matéria seca por unidade de peso inicial e um intervalo de tempo (Reis & Muller, 1979). Nos resultados obtidos, a TCR apresentou diferença entre os tratamentos de disponibilidade hídrica apenas no subperíodo V10 - R2, tanto na Safra quanto na Safrinha, com menores valores no tratamento com déficit hídrico. Posteriormente houve uma inversão deste tratamento, no subperíodo R6 - R8 da Safrinha. A TCR decresceu à medida que as plantas cresceram, sendo a tendência natural característica do crescimento das plantas (Lucchesi, 1984).

A TAL não apresentou diferença entre os tratamentos na maioria dos subperíodos. Na Safra, apenas no V10 - R2 houve diferença, com maiores valores para o controle. Na Safrinha, por outro lado, este parâmetro foi negativo no controle, nulo sob excesso hídrico e pouco positiva sob déficit hídrico no R6 - R8, tendência similar ao descrito por De Campos et al. (2011). Segundo esses autores, no final do ciclo ocorre uma drástica redução da taxa fotossintética, que está ligada diretamente a TAL, havendo gasto de energia das reservas da planta para translocar o máximo de fotoassimilados para a parte reprodutiva.

Tanto na Safra quanto na Safrinha, a TCFR foi negativa no final do ciclo, o que é esperado devido a senescência de folhas nessa fase. Nas duas épocas de semeadura a

Tabela 1. Análise de crescimento em função da soma térmica da cultura do girassol conduzido sob condições de déficit hídrico (Déf), controle (Cont) e excesso hídrico (Exc) na Safra e Safrinha do Rio Grande do Sul em diferentes subperíodos.

Estádios	Condição Hídrica	TCC	TCR	TAL	TCFR	DAF	RAF	AFE
SAFRA								
EM - V10	Déf	0,0486 b	-	-	-	3,9496 a	1,6904 a	2,5734 a
	Cont	0,0571 a	-	-	-	4,2537 a	1,5554 b	2,3981 ab
	Exc	0,0525 ab	-	-	-	4,0452 a	1,5955 ab	2,3726 b
V10 - R2	Déf	0,7875 c	0,0076 b	0,0085 b	0,0053 b	31,2864 c	0,7329 a	2,3490 a
	Cont	1,2343 a	0,0083 a	0,0095 a	0,0063 a	48,0214 a	0,7256 a	2,1799 b
	Exc	0,9787 b	0,0079 ab	0,0084 b	0,0061 a	41,9538 b	0,7945 a	2,3710 a
R2 - R6	Déf	0,8009 b	0,0017 a	0,0036 a	0,0001 a	47,8985 c	0,4725 ab	2,0776 b
	Cont	1,4592 a	0,0019 a	0,0042 a	0,0000 a	75,0229 a	0,4497 b	1,9994 b
	Exc	0,9938 b	0,0017 a	0,0034 a	-0,0002 a	62,6767 b	0,4995 a	2,2336 a
R6 - R8	Déf	0,4509 b	0,0006 a	0,0024 a	-0,0010 a	39,0546 c	0,2735 a	1,8205 ab
	Cont	0,6063 ab	0,0005 a	0,0021 a	-0,0010 a	59,7095 a	0,2511 a	1,8002 b
	Exc	0,9745 a	0,0009 a	0,0034 a	-0,0008 a	50,1076 b	0,2614 a	1,9122 a
SAFRINHA								
EM - V10	Déf	0,0404 a	-	-	-	1,5536 a	1,5225 a	2,7286 a
	Cont	0,0419 a	-	-	-	1,5992 a	1,5238 a	2,6793 a
	Exc	0,0429 a	-	-	-	1,6707 a	1,5459 a	2,7832 a
V10 - R2	Déf	0,5104 b	0,0066 b	0,0076 a	0,0048 b	22,2947 b	0,7168 b	2,1939 b
	Cont	0,8776 a	0,0077 a	0,0079 a	0,0063 a	42,5495 a	0,8223 a	2,2529 b
	Exc	0,8186 a	0,0075 a	0,0081 a	0,0060 a	39,6987 a	0,8186 a	2,4227 a
R2 - R6	Déf	0,7003 c	0,0021 a	0,0042 a	0,0004 a	30,2266 c	0,4982 a	2,1888 ab
	Cont	1,6278 a	0,0023 a	0,0048 a	0,0002 a	59,2789 a	0,5219 a	2,1162 b
	Exc	1,2719 b	0,0027 a	0,0043 a	-0,0002 a	51,9978 b	0,5206 a	2,2539 a
R6 - R8	Déf	0,2919 a	0,0005 a	0,0017 a	-0,0009 a	29,6433 c	0,3148 a	2,1560 a
	Cont	-0,1571 b	0,0002 b	-0,0006 b	-0,0022 b	48,8653 a	0,2994 a	1,9779 b
	Exc	-0,0106 ab	0,0000 b	0,0000 b	-0,0031 c	37,1567 b	0,2587 b	2,0007 b

* Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Taxa de crescimento da cultura (TCC) em $g\ m^{-2}\ ^{\circ}C\ dia^{-1}$; taxa de crescimento relativo (TCR) em $g\ g^{-1}\ ^{\circ}C\ dia^{-1}$; taxa de assimilação líquida (TAL) em $g\ dm^{-2}\ ^{\circ}C\ dia^{-1}$; taxa de crescimento foliar relativo (TCFR) em $g\ g^{-1}\ ^{\circ}C\ dia^{-1}$; duração da área foliar (DAF) em $dm^2\ dia^{-1}$; razão da área foliar (RAF) $dm^2\ g^{-1}$; área foliar específica (AFE) em $dm^2\ g^{-1}$.

TCFR apresentou menores valores logo no V10 - R2, significando que nessa fase o crescimento foliar já estava sendo prejudicado por esse tratamento. Tal resultado, está relacionado ao menor crescimento e expansão das folhas, consequência da perda de turgescência nas células das folhas quando da ocorrência de déficit hídrico. Quanto à duração da área foliar, a partir do subperíodo V10 - R2 foi sempre maior no tratamento controle, seguido do excesso hídrico, com os piores resultados para o déficit hídrico em ambas as épocas de semeadura. Também se verificou duração da área foliar maior na Safra do que na Safrinha.

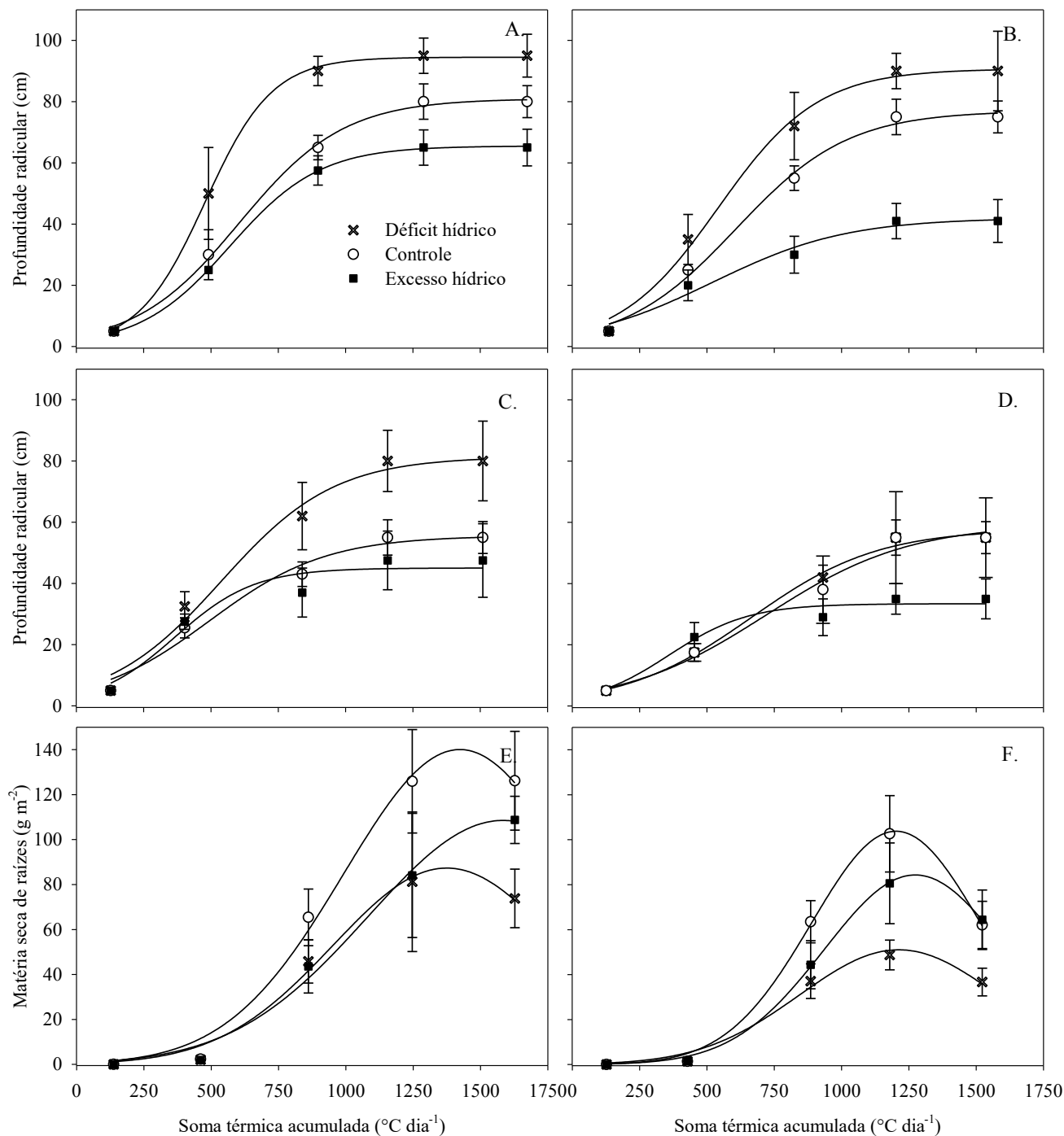
A razão de área foliar praticamente não apresentou diferença entre os tratamentos de disponibilidade hídrica, sendo observada apenas a tendência natural de comportamento, na qual, maiores valores ocorrem no início e tendência à redução no final do ciclo (Urchei et al., 2000; Garcia et al., 2008). Isso significa que a planta manteve equilíbrio da relação entre a massa seca foliar com a massa seca da planta inteira. Já a área foliar específica durante

quase todo o ciclo foi maior no excesso hídrico, seguido do déficit hídrico, sendo que o controle apresentou os menores valores, tanto na Safra quanto na Safrinha. Esse resultado revela que tanto o excesso quanto o déficit hídrico levam a planta a formar folhas de maior espessura, com uma maior densidade foliar.

A modelagem da profundidade do sistema radicular (cm) e da matéria seca de raízes ($g\ m^{-2}$) é apresentada na Figura 1. Verifica-se diferença no aprofundamento radicular entre os tratamentos de disponibilidade hídrica nas épocas de semeadura e entre os solos (Figuras 1A, 1B, 1C, 1D). A matéria seca diferiu entre épocas de semeadura e os tratamentos de disponibilidade hídrica, não diferindo entre solos (Figuras 1E, 1F).

O modelo sigmoidal foi o que melhor se ajustou aos dados de profundidade radicular em função da soma térmica (Tabela 2). Obteve-se um modelo para cada condição hídrica, tipo de solo e época de semeadura, tendo em vista que o aprofundamento radicular foi

Figura 1. Aprofundamento radicular (A, B, C e D) e matéria seca de raízes (E e F) do girassol conduzido sob déficit hídrico, controle e excesso hídrico na Safra e Safrinha no Argissolo de Santa Maria/RS e no Latossolo de Panambi/RS, como função da soma térmica. Argissolo Safra (A); Latossolo Safra (B); Argissolo Safrinha (C); Latossolo Safrinha (D); Safra (E); Safrinha (F).



significativamente afetado pelos três fatores. As estatísticas do EAM, RQME e “d” obtidas revelam boa precisão dos modelos. O aprofundamento foi maior nos tratamentos de déficit hídrico, seguidos pelo controle e pelo excesso hídrico. Isso ocorre em resposta aos hormônios vegetais responsáveis pela adaptação da planta a condição impostas, as auxinas e o etileno promovem o crescimento de raízes secundárias, enquanto as citocininas e o ABA promovem o aprofundamento radicular (Aloni et al., 2006; Acharya & Assmann, 2009).

Quando cultivado na Safra, o girassol teve um aprofundamento de raízes maior do que na Safrinha. Esse resultado pode estar relacionado à demanda hídrica atmosférica da Safrinha ter sido alta no início do ciclo, levando a uma rápida redução da umidade do solo e assim aumentando a resistência à penetração. Entre solos a diferença foi significativa com um aprofundamento radicular menor no Latossolo (Tabela 2). Conforme Rosolem et al. (1999), quando ocorre o déficit hídrico, a resistência a penetração das raízes aumenta em solos com teor de

Tabela 2. Coeficientes linear (a), angular (b) e de determinação (R²), x0 e P-valor dos modelos obtidos na modelagem da profundidade radicular (cm) (1 a 12) e da matéria seca de raízes (g m⁻²) (13 a 18) do girassol conduzido sob déficit, controle e excesso hídrico na Safra e Safrinha em Argissolo e Latossolo. Erro absoluto médio (EAM), raiz do quadrado médio do erro (RQME) e índice d de Willmott.

Nº modelo	Utilização	Modelo	a	b	x0	p-valor	R2	EAM	RQME	d
1	Arg Safra Def	Sigm.	94,49*	124,49*	478,31*	0,00	0,99	7,55	9,38	0,98
2	Arg Safra Cont	Sigm.	80,96*	194,06*	606,08*	0,00	0,99	5,48	6,35	0,98
3	Arg Safra Exc	Sigm.	65,51*	167,46*	569,96*	0,00	0,99	3,94	5,54	0,98
4	Arg Safrin Def	Sigm.	81,36*	210,67ns	537,77*	0,01	0,96	5,33	6,33	0,98
5	Arg Safrin Cont	Sigm.	55,56*	216,69ns	494,14*	0,02	0,95	2,96	4,06	0,98
6	Arg Safrin Exc	Sigm.	45,02*	147,21ns	366,44*	0,05	0,89	4,22	5,13	0,97
7	Lat Safra Def	Sigm.	90,69*	185,07*	541,87*	0,00	0,98	2,73	3,12	0,99
8	Lat Safra Cont	Sigm.	76,97*	209,01*	608,39*	0,00	0,99	6,00	6,94	0,98
9	Lat Safra Exc	Sigm.	41,98*	249,52ns	520,93*	0,02	0,95	3,27	3,50	0,98
10	Lat Safrin Def	Sigm.	59,47*	267,22ns	719,97*	0,01	0,97	3,71	4,68	0,98
11	Lat Safrin Cont	Sigm.	57,79*	237,09*	664,40*	0,00	0,98	1,14	1,40	0,99
12	Lat Safrin Exc	Sigm.	33,41*	147,65ns	360,38*	0,03	0,93	4,37	5,07	0,94
13	Safra - Def	P. Gauss.	87,33*	422,42*	1374,67*	0,01	0,97	6,26	7,30	0,98
14	Safra - Cont	P. Gauss.	140,05*	430,95*	1423,62*	0,00	0,98	10,03	11,51	0,98
15	Safra - Exc	P. Gauss.	108,53*	501,11*	1583,83*	0,00	0,98	9,38	11,82	0,98
16	Safrinha - Def	P. Gauss.	51,04*	368,39*	1212,24*	0,01	0,97	4,77	6,09	0,97
17	Safrinha - Cont	P. Gauss.	103,77*	314,05*	1202,36*	0,00	0,99	7,66	11,44	0,97
18	Safrinha - Exc	P. Gauss.	84,32*	337,83*	1273,34*	0,00	0,99	5,11	6,91	0,98

Arg = Argissolo de Santa Maria; Lat = Latossolo de Panambi; Safra = época de semeadura preferencial; Safrin = Safrinha, época de semeadura tardia; Def = Déficit hídrico; Cont = Controle hídrico; Exc = Excesso hídrico. * Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro no teste F. ns = não significativo. Sigm. = modelo sigmoidal, $y = a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$. P. Gauss. = modelo pico gaussiano, $y = a*\exp(-0.5*((x-x_0)/b)^2)$.

argila maior que 40%, de modo que o aprofundamento é dificultado em relação a solos com menores teores de argila na camada inicial, a exemplo do Argissolo. Para a cultura da canola, Hergert et al. (2016) verificaram que em solos arenosos a cultura foi capaz de extrair água do solo de profundidades superiores a 1,2 m, quando em situações de deficiência hídrica.

Os modelos para estimar a profundidade radicular em função da soma térmica podem ser utilizados para auxiliar na determinação da capacidade de armazenamento de água disponível às plantas computando sua variação ao longo do ciclo. Por exemplo, a camada de solo explorada pelo sistema radicular em um solo com excedente hídrico é menor do que em um solo com déficit hídrico, pois a raiz tem um aprofundamento menor nos solos mantidos mais úmidos (Kage et al., 2004). É possível afirmar que o aprofundamento radicular varia com o tipo e a condição hídrica do solo e também com a época de semeadura da cultura. Portanto, foram elaborados os modelos para contemplarem essas diferentes situações (Tabela 2).

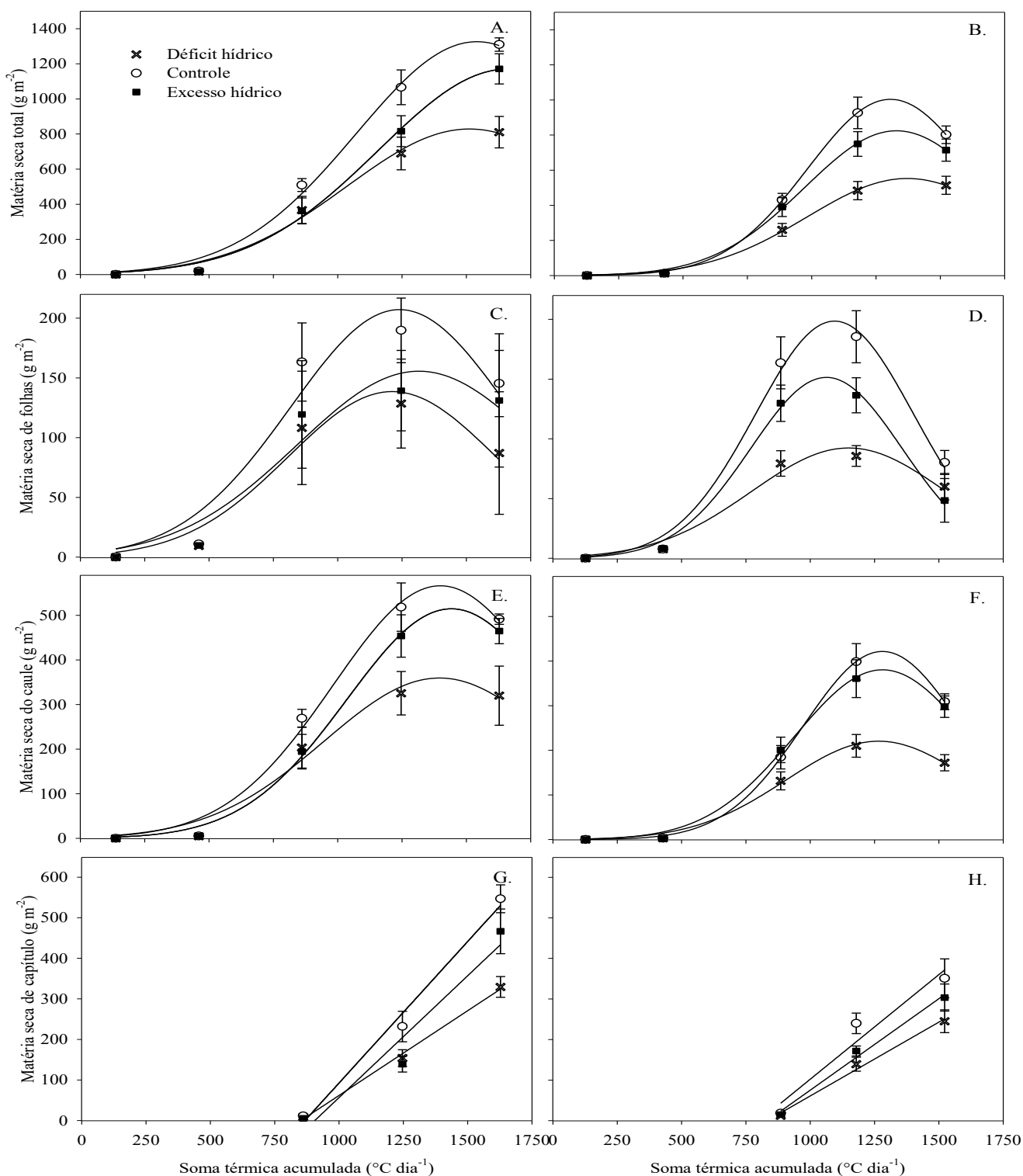
Os dados de massa de matéria seca de raízes foram melhor representados por modelos de pico gaussiano, com ajuste dos modelos (Figuras 1E, 1F). Todos os coeficientes da equação foram significativos e as estatísticas apresentaram ótimo resultado (Tabela 2). A matéria seca não apresentou diferença entre solos, podendo ser utilizado um único modelo para ambos os solos (Argissolo

e Latossolo). Entretanto, para profundidade de raízes ocorreu diferença entre solos. Portanto, mesmo que o aprofundamento ocorra de maneira distinta nos dois solos, essa característica não interfere significativamente no crescimento em matéria seca. A partir dos resultados de obtenção e das estatísticas de teste desses modelos, pode-se inferir que os modelos matemáticos podem ser usados para estimar o acúmulo de massa de matéria seca de raízes ao longo do ciclo utilizando-se apenas a soma térmica.

Os modelos que melhor se ajustaram a matéria seca total (g m⁻²), a matéria seca de folhas (g m⁻²) e a matéria seca de caule (g m⁻²) também foram os de pico gaussiano (Figura 2). Essas variáveis também não apresentaram diferença significativa entre os solos. Os coeficientes de todas as equações foram significativos (Tabela 3). As equações foram significativas para praticamente todas equações, apresentando p-valor abaixo de 0,05. As estatísticas revelaram boa precisão dos modelos. Utilizando esses modelos pode-se, por exemplo, prever o acúmulo de matéria seca em cada parte da planta para cada condição hídrica e época de semeadura nesses solos estudados.

A matéria seca de capítulo (g m⁻²) foi melhor ajustada por modelos lineares (Figuras 2G, 2H), sendo a maioria significativos a p<0,10 (Tabela 4). Apesar disso, o desempenho dos modelos analisado pelas estatísticas foi satisfatório. Salienta-se que o capítulo do girassol começa a se destacar apenas após R1, que é o início da fase

Figura 2. Modelagem da matéria seca total (A e B), matéria seca de folhas (C e D), matéria seca de caule (E e F) e matéria seca do capítulo (G e H) do girassol conduzido sob déficit hídrico, controle e excesso hídrico na Safra (A, C, E, G) e Safrinha (B, D, F, H), como função da soma térmica, conforme os modelos ajustados.



reprodutiva. Portanto, o modelo tem validade a partir do início do crescimento e acúmulo expressivo de matéria seca no capítulo do girassol, que se estende até o final do ciclo.

Conclusões

A condição hídrica que mais afeta negativamente o crescimento do girassol é o déficit hídrico, seguido pelo excesso hídrico.

A época de semeadura tem influência sobre o crescimento do girassol em matéria seca e profundidade do sistema radicular, enquanto o tipo de solo influencia

Tabela 3. Coeficientes linear (a), angular (b) e de determinação (R²), x0 e P-valor dos modelos obtidos na modelagem da matéria seca total (g m⁻²) (19 a 24), da matéria seca de folhas (g m⁻²) (25 a 30) e da matéria seca de caule (g m⁻²) (31 a 36) do girassol conduzido sob déficit, controle e excesso hídrico na Safra e Safrinha em Argissolo e Latossolo. Erro absoluto médio (EAM), raiz do quadrado médio do erro (RQME) e índice d de Willmott.

Nº modelo	Utilização	Equação	a	b	x0	p-valor	R2	EAM	RQME	D
19	Safra Def	P. Gauss.	828,50*	476,17*	1512,05*	0,00	0,98	46,00	60,93	0,99
20	Safra Cont	P. Gauss.	1325,97*	468,24*	1541,36*	0,00	0,98	28,83	41,34	0,99
21	Safra Exc	P. Gauss.	1170,81*	503,64*	1663,77*	0,00	0,99	63,37	73,29	0,99
22	Safrin Def	P. Gauss.	552,92*	387,81*	1371,77*	0,00	0,99	39,13	49,68	0,98
23	Safrin Cont	P. Gauss.	1003,63*	322,37*	1306,47*	0,00	0,99	38,06	48,80	0,99
24	Safrin Exc	P. Gauss.	824,39*	357,84*	1329,63*	0,00	0,99	18,12	26,87	0,99
25	Safra Def	P. Gauss.	138,57*	404,06*	1211,89*	0,03	0,92	13,22	14,78	0,97
26	Safra Cont	P. Gauss.	207,17*	423,17*	1240,42*	0,05	0,88	15,96	19,57	0,98
27	Safra Exc	P. Gauss.	155,63*	471,04*	1315,50*	0,06	0,87	19,61	25,90	0,95
28	Safrin Def	P. Gauss.	92,34*	377,44*	1149,63*	0,02	0,95	7,19	8,98	0,98
29	Safrin Cont	P. Gauss.	198,53*	308,03*	1094,67*	0,00	0,98	16,04	18,69	0,98
30	Safrinha Exc	P. Gauss.	151,42*	294,79*	1062,96*	0,00	0,98	4,87	7,78	0,99
31	Safra Def	P. Gauss.	359,56*	448,37*	1395,89*	0,02	0,95	30,28	38,09	0,98
32	Safra Cont	P. Gauss.	566,37*	417,05*	1399,20*	0,00	0,98	18,39	22,76	0,99
33	Safra Exc	P. Gauss.	514,77*	405,09*	1441,79*	0,00	0,99	30,43	35,82	0,99
34	Safrin Def	P. Gauss.	220,49*	359,29*	1265,78*	0,00	0,99	16,02	19,37	0,98
35	Safrin Cont	P. Gauss.	421,76*	306,45*	1280,50*	0,00	0,99	11,79	17,83	0,99
36	Safrin Exc	P. Gauss.	380,59*	342,75*	1280,76*	0,00	0,99	8,91	10,96	0,99

Safra = época de semeadura preferencial; Safrin = Safrinha, época de semeadura tardia; Def = Déficit hídrico; Cont = Controle hídrico; Exc = Excesso hídrico. * Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro no teste F. P. Gauss. = modelo pico gaussiano, $y = a \cdot \exp(-0.5 \cdot ((x-x_0)/b)^2)$.

Tabela 4. Coeficientes linear (a) e de determinação (R²), y0 e p-valor dos modelos obtidos na modelagem da matéria seca do capítulo (g m⁻²) do girassol conduzido sob déficit, controle e excesso hídrico na Safra e Safrinha em Argissolo e Latossolo. Erro absoluto médio (EAM), raiz do quadrado médio do erro (RQME) e índice d de Willmott.

Nº modelo	Utilização	Equação	a	y0	p-valor	R2	EAM	RQME	d
37	Safra Def	Linear	0,41*	- 356,09ns	0,03	0,99	7,13	7,57	0,99
38	Safra Cont	Linear	0,69ns	- 605,25ns	0,06	0,98	21,66	22,98	0,99
39	Safra Exc	Linear	0,60ns	- 544,16ns	0,15	0,88	43,67	46,33	0,98
40	Safrinha Def	Linear	0,36ns	- 303,18ns	0,06	0,98	8,72	9,26	0,99
41	Safrinha Cont	Linear	0,52ns	- 413,75ns	0,14	0,89	30,22	32,10	0,98
42	Safrinha Exc	Linear	0,45ns	- 375,93s	0,06	0,98	10,52	11,16	0,99

Safra = época de semeadura preferencial; Safrinha = época de semeadura tardia; Def = Déficit hídrico; Cont = Controle hídrico; Exc = Excesso hídrico. * Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro no teste F. ns = não significativo. Linear. = modelo da regressão linear, $y = a \cdot x + y_0$.

apenas a profundidade do sistema radicular.

O modelo pico gaussiano descreve melhor o crescimento do girassol em matéria seca e em profundidade radicular.

Contribuições dos autores

L.H. LOOSE; J.R. SILVA e M. LEONARDI foram responsáveis pela concepção do trabalho, coleta de dados e redação do artigo. S.Z. RADONS foi responsável pela revisão do artigo. A.B. HELDWEIN e M. P. BORTOLUZZI foram responsáveis pela concepção do trabalho e redação do artigo.

Referências

- ACHARYA, B. R.; ASSMANN, S. M. Hormone interactions in stomatal function. *Plant molecular biology*, v.69, n.4, p. 451-462, 2009. DOI: 10.1007/s11103-008-9427-0
- AHMED, M.; FATIMA, Z.; IQBAL, P.; KALSOOM, T. ABBASI, K. S.; SHAHEEN, F. A.; AHMAD, S. Potato Modeling. *Systems Modeling*, v.14, p.383-401 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-4728-7_14
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. *Evapotranspiración del cultivo: guías for la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO, v. 298, n. 0, 2006.
- ALONI, R.; ALONI, E.; LANGHANS, M.; ULLRICH, C. I. Role of cytokinin and auxin in shaping root architecture: regulating vascular differentiation, lateral root initiation, root apical dominance and root gravitropism. *Annals of Botany*, v.97, n.5, p.883-893, 2006. DOI: 10.1093/aob/mcl027

- ANJUM, S. A.; XIE, X.; WANG, L.; SALEEM, M. F.; MAN, C.; LEI, W. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, v.6, n.9, p.2026-2032, 2011. DOI: 10.5897/AJAR10.027
- BARCELOS, D. M.; GARCIA, A.; MACIEL JUNIOR, V. A. Análise de crescimento da cultura da batata submetida ao parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura, em um latossolo vermelho-amarelo. *Ciência e Agrotecnologia*, v.31, n.1, p.21-27, 2007. DOI: 10.1590/S1413-70542007000100003
- BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; SANTOS, A. O.; FRANÇA, S.; RADIN, B. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, n.7, p.949-956, 2001. DOI: 10.1590/S0100-204X2001000700004
- CASADEBAIG, P.; GUILIONI, L.; LECOEURB, J.; CHRISTOPHE, A.; CHAMPOLIVIER, L.; DEBAEKE, P. SUNFLO, a model to simulate genotype-specific performance of the sunflower crop in contrasting environments. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.151, n.2, p.163-178, 2011. DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.09.012
- CONNOR, D. J.; FERERES, E. A dynamic model of crop growth and partitioning of biomass. *Field Crops Research*, v.63, n.2, p.139-157, 1999. DOI: 10.1016/S0378-4290(99)00032-5
- DE CAMPOS, M. F.; ONO, E. O.; BOARO, C. S. F.; RODRIGUES, J. D. Análise de crescimento em plantas de soja tratadas com substâncias reguladoras. *Biotemas*, v.21, n.3, p.53-63, 2011. DOI: 10.5007/2175-7925.2008v21n3p53
- DOURADO NETO, D.; GARCÍA Y GARCÍA, A.; FANCELLI, A. L.; FRIZZONE, J. A.; REICHARDT, K. Balance hídrico cíclico y secuencial: estimación de almacenamiento de agua en el suelo. *Scientia Agrícola*, v.56, n.3, p.537-546, 1999. DOI: 10.1590/S0103-90161999000300005
- GARCIA, A.; ANDRÉ, R. G. B.; GALBIATTI, J. A.; TANNOUS, S. Análise de crescimento de uma cultura de milho submetida a diferentes regimes hídricos. *Nucleus*, v.5, n.1, 2008. DOI: 10.3738/nucleus.v5i1.60
- HERGERT, G.W.; MARGHEIM, J.F.; PAVLISTA, A.D.; MARTIN, D.L.; SUPALLA, R. J.; ISBELL, T.A. Yield, irrigation response, and water productivity of deficit to fully irrigated spring canola. *Agricultural Water Management*, v.168, p.96-103, 2016. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.02.003
- KAGE, H.; KOCHLER, M.; STÜTZEL, H. Root growth and dry matter partitioning of cauliflower under drought stress conditions: measurement and simulation. *European Journal of Agronomy*, v.20, n.4, p.379-394, 2004. DOI: 10.1016/S1161-0301(03)00061-3
- KLEINPAUL, J. A.; CARGNELUTTI FILHO, A., CARINI, F.; PEZZINI, R. V.; CHAVES, G. G.; THOMASI, R. M. Productive traits of rye cultivars grown under different sowing seasons. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.23, n.12, p.937-944, 2019. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v23n12p937-944
- KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. *Disciplinarum Scientia Naturais e Tecnológicas*, v.2, n.1, p.171-182, 2001. DOI: 10.37779/nt.v2i1.1136
- LEITE, R. M. V. B de C.; CASTRO, C. de; BRIGHENTI, A. M.; OLIVEIRA, F. A. de; CARVALHO, C. G. P. de; OLIVEIRA, A. C. B. de. **Indicações para o cultivo de girassol nos Estados do Rio Grande do Sul, Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás e Roraima**. Embrapa Soja- Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2007. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPSo-2009-09/28045/1/comtec78_girassol.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2020.
- LUCCHESI, A. A. Utilização prática da análise de crescimento vegetal. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*, v.41, n.1, p.181-201, 1984. DOI: 10.1590/S0071-12761984000100011
- MALDANER, I. C.; HELDWEIN, A. B.; LOOSE, L. H.; LUCAS, D. D. P.; GUSE, F. I.; BORTOLUZZI, M. P. Modelos de determinação não-destrutiva da área foliar em girassol. *Ciência Rural*, v.39, p.1356-1361, 2009. DOI: 10.1590/S0103-84782009000500008
- MATZENAUER, R.; MALUF, J. R. T.; BUENO, A. C. Relações da evapotranspiração máxima do girassol (*Helianthus Annuus L.*) com a evapotranspiração de referência e com a radiação solar global. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v.5, n.2, p.241-247, 1999.
- MALDANER, I. C. **Probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica na cultura do girassol na Região Central do Rio Grande do Sul**. 2012. 141 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- MCMMASTER, G. S.; EDMUNDS, D. A.; WILHELM, W. W.; NIELSEN, D. C.; PRASAD, P. V. V.; ASCOUGH, J. C. PhenologyMMS: A program to simulate crop phenological responses to water stress. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.77, n.1, p.118-125, 2011. DOI: 10.1016/j.compag.2011.04.003
- PEREIRA, A. R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. *Bragantia*, v. 64, n.2, p.311-313, 2005. DOI: 10.1590/S0006-87052005000200019
- REIS, G. G. dos; MULLER, M. W. **Análise de crescimento de plantas: mensuração do crescimento**. Belém: CPATU, 1979. 47p.
- RIGHI, E. Z.; HELDWEIN, A. B.; MALDANER, I. C.; LUCAS, D. D. P. STÜKER, P. E. Balance of longwave radiation employing the rate of solar radiation for Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, v.46, n.1, p.29-37, 2015. DOI: 10.1590/S1806-66902015000100004
- ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.34, n.5, p.821-828, 1999. DOI: 10.1590/S0100-204X1999000500013
- SCHUCH, L. O. B.; NEDEL, J. L.; ASSIS, F. N.; MAIA, M. S. Vigor de sementes e análise de crescimento de aveia preta. *Scientia Agrícola*, v.57, n.2, p. 05-312, 2000. DOI: 10.1590/S0103-90162000000200018
- SINCLAIR, T. R.; SELIGMAN, N. G. Crop modeling: from infancy to maturity. *Agronomy Journal*, Hoboken, v.88, n.5, p.698-704, 1996. DOI:10.2134/agronj1996.00021962008800050004xCitations: 178
- STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222 p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MÖLLER, I.M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p.
- URCHEI, M. A.; RODRIGUES, J. D.; STONE, L. F. Análise de crescimento de duas cultivares de feijoeiro sob irrigação, em plantio direto e preparo convencional. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.35, n.3, p.497-506, 2000. DOI: 10.1590/S0100-204X2000000300004
- WMO. **Guide to the global observing system**. n.488, Geneva: World Meteorological Organization, 2010. 172p.
- XIANGXIANG, W.; QUANJIU, W.; JUN, F.; QIUPING, F. Evaluation of the AquaCrop model for simulating the impact of water deficits and different irrigation regimes on the biomass and yield of winter wheat grown on China's Loess Plateau. *Agricultural Water Management*, v.129, p.95-104, 2013. DOI: 10.1016/j.agwat.2013.07.010

REFERENCIAÇÃO

- LOOSE, L. H.; SILVA, J. R.; HELDWEIN, A. B.; BORTOLUZZI, M. P.; LEONARDI, M.; RADONS, S. Z. Modelagem do crescimento do girassol sob diferentes épocas de semeadura, regimes hídricos e solos. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.29, e026784, 2021.



Sunflower growth modeling under different sowing times, water regimes and soils

Luis Henrique Loose^{1(*)}, Jocélia Rosa da Silva², Arno Bernardo Heldwein², Mateus Possebon Bortoluzzi³, Mateus Leonardi² and Sidinei Zwick Radons⁴

¹Instituto Federal Farroupilha - Campus Santo Ângelo. Rodovia RS 218, Km 5, Indúbras, CEP 98806-700 Santo Ângelo, RS, Brazil.

E-mail: luis.loose@iffarroupilha.edu.br

²Universidade Federal de Santa Maria. Av. Roraima, 1000, CEP 97.105-000 Santa Maria, RS, Brazil. E-mails: joceliarosa.s@gmail.com, heldweinab@smail.ufsm.br and mateus-leonardi@hotmail.com

³Universidade de Passo Fundo, Brazil. E-mail: mateusbortoluzzi@hotmail.com

⁴Universidade Federal da Fronteira Sul, Brazil. E-mail: radons@uffs.edu.br

(*)Corresponding author.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 September 2020

Accepted 9 June 2021

Index terms:

Helianthus annuus L.

crop water requirement

Southern Brazil

ABSTRACT

The objective of this paper was to model sunflower growth under different sowing times, water availability and soil conditions. The experiment was carried out in Santa Maria/RS (Ultisol) and Panambi/RS (Oxisol) with three water conditions (drought, water surplus and control) and sowing dates early September and early January. To determine the soil water condition, a daily sequential water balance was performed. Plants were collected at four stages of phenological development: V10, R2, R6 and R8. To analyze sunflower growth, the following were used: crop growth rate, relative growth rate, net assimilation rate, relative leaf growth rate, leaf area duration, leaf area ratio and specific leaf area. In addition, a modeling of the growth in dry matter of each part of the plant and the depth of the root system. Our data showed that water deficit was the condition that most affected sunflower growth, followed by water surplus. The peak Gaussian growth model, in general, was the one that best suited the dry matter and depth of sunflower roots, showed good fit to the measured data and can be used for different locations with good accuracy for the conditions in which it was developed this work.

© 2021 SBAgro. All rights reserved.

CITATION

LOOSE, L. H.; SILVA, J. R.; HELDWEIN, A. B.; BORTOLUZZI, M. P.; LEONARDI, M.; RADONS, S. Z. Modelagem do crescimento do girassol sob diferentes épocas de semeadura, regimes hídricos e solos. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.29, e026784, 2021.