

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

Paulo Eugênio Schaefer

**MANEJO DE CANOLA EM TERRAS BAIXAS: CARACTERÍSTICAS
DO DOSSEL, INTERCEPTAÇÃO DA RADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE
DE GRÃOS**

Santa Maria, RS

2021

Paulo Eugênio Schaefer

**MANEJO DE CANOLA EM TERRAS BAIXAS: CARACTERÍSTICAS DO DOSSEL,
INTERCEPTAÇÃO DA RADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Agronomia**

Orientador: Prof. Dr. Arno Bernardo Heldwein

Santa Maria, RS

2021

This study was financed in part by the Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Schaefer, Paulo Eugênio

MANEJO DE CANOLA EM TERRAS BAIXAS: CARACTERÍSTICAS DO DOSSEL, INTERCEPTAÇÃO DA RADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS / Paulo Eugênio Schaefer. - 2021.

162 p.; 30 cm

Orientador: Arno Bernardo Heldwein

Coorientador: Astor Henrique Nied

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Agronomia, RS, 2021

1. Excesso hídrico 2. Radiação Fotossinteticamente Ativa 3. Drenagem superficial 4. Caracteres produtivos 5. *Brassica napus* L. I. Heldwein, Arno Bernardo II.

Nied, Astor Henrique III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

©2021

Todos os direitos autorais reservados a Paulo Eugênio Schaefer. A reprodução de partes ou todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: pauloeugenioschaefer@gmail.com

Paulo Eugênio Schaefer

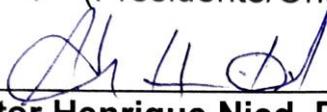
**MANEJO DE CANOLA EM TERRAS BAIXAS: CARACTERÍSTICAS DO DOSSEL,
INTERCEPTAÇÃO DA RADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Agronomia**

Aprovado em 27 de agosto de 2021:



Arno Bernardo Heldwein, Prof. Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



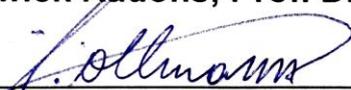
Astor Henrique Nied, Prof. Dr. (UFSM)



Jorge Alberto de Gouvêa, Pesq. Dr. (EMBRAPA Trigo)



Sidinei Zwick Radons, Prof. Dr. (UFFS/Cerro Largo)



Diego Nicolau Follmann, Prof. Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Antônio Vendelino Schaefer e Lori Hemsing Schaefer, por todos os ensinamentos e educação repassados para que eu pudesse trilhar com segurança e êxito meu caminho até aqui. Por todo amor, carinho, compreensão e incentivo durante toda vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a **Deus**, por me conceder forças e iluminar meu caminho na trajetória em busca de alcançar os objetivos propostos.

A minha família, em especial meus pais **Antônio Vendelino Schaefer e Lori Hemsing Schaefer**, além de serem os maiores exemplos na minha vida, sempre fornecerem apoio, incentivo e suporte para que fossemos estudar. Por todo amor, carinho e força diante dos obstáculos.

Ao meu orientador Prof. **Arno Bernardo Heldewein**, agradeço a orientação, oportunidade, confiança, amizade e ensinamentos compartilhados durante toda jornada nestes anos, que foram essenciais para atingir os objetivos.

Ao Prof. **Astor Henrique Nied**, que não mediu esforços para auxiliar na orientação deste trabalho, ensinamentos, aprendizado, paciência e amizade dedicada durante estes anos de trabalho.

Ao Prof. **Evandro Zanini Righi** (in memoriam), pela confiança em mim depositada, garra e vontade em aprofundar os conhecimentos das relações ambiente x dossel vegetal em terras baixas.

À **Universidade Federal de Santa Maria**, ao **Centro de Ciências Rurais e Departamento de Fitotecnia**, pela acolhida, suporte e espaço para com estes anos de caminhada acadêmica e de pesquisa nesta instituição.

A **Embrapa Trigo** pela cedência dos equipamentos, fundamentalmente necessários para realização do monitoramento das condições micrometeorológicas do dossel vegetal.

Aos **professores e funcionários do Departamento de Fitotecnia e Programa de Pós-Graduação em Agronomia** por contribuírem de uma forma ou de outra pela conquista deste título. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (**CAPES**), pela concessão da bolsa.

Aos **amigos, colegas de pós-graduação e bolsistas de iniciação científica**, que não mediram esforços para atingirmos os objetivos propostos, rodas de conversa e discussão, as trocas de conhecimento e a amizade.

A todos aqueles que direta ou indiretamente, aqui não mencionados, contribuíram para o êxito deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

Muito Obrigado!

RESUMO

MANEJO DE CANOLA EM TERRAS BAIXAS: CARACTERÍSTICAS DO DOSEL, INTERCEPTAÇÃO DA RADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS

AUTOR: Paulo Eugênio Schaefer
ORIENTADOR: Arno Bernardo Heldwein

A modificação das condições microclimáticas de culturas agrônomicas pode afetar substancialmente o crescimento e rendimento de grãos em ambientes com excesso hídrico. Assim, o presente trabalho teve como objetivo determinar o efeito da modificação do arranjo espacial de plantas em dossel de canola em Argissolo Bruno-Acinzentado Alítico úmbrico com e sem drenagem superficial do solo, na depressão central do Rio Grande do Sul. Neste sentido, foram conduzidos experimentos em condições de campo em 2018 e 2019, utilizando-se o delineamento experimental em blocos casualizados com faixas para o fator drenagem superficial do solo, em esquema bifatorial 2 x 4, com 4 repetições. Os tratamentos consistiram em, com e sem drenos superficiais (fator drenagem) e espaçamento entre linhas de 0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m (fator espaçamento). A cultivar de canola utilizada foi a Diamond, com densidade populacional de 40 plantas m⁻² após o raleio. Os sulcos de 0,25 m de largura e profundidade foram abertos com uma valetadeira ao redor das unidades experimentais para a drenagem. Foram realizadas avaliações fenológicas, caracteres de crescimento, área foliar, matéria seca, densidade final de plantas, número de síliquas por planta, número de grãos por síliqua, massa de mil grãos, produtividade de grãos e parâmetros de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (RFA). Para a mensuração RFA incidente e transmitida em dossel foram utilizados sensores artesanais contendo cinco fotocélulas de silício amorfo com leituras intercaladas a cada 30 segundos a partir do estágio de roseta da cultura. O uso de drenagem superficial do solo (CD) reduziu a persistência da elevação do lençol freático no perfil. O excesso hídrico do solo atrasou o desenvolvimento das plantas para obtenção do IAF máximo e do ciclo total da cultura. O coeficiente de extinção da RFA foi superior no espaçamento 0,17 m, reduzindo com o aumento de espaçamento. A eficiência do uso da radiação (EUR) variou entre 1,49 a 3,08 g MJ⁻¹, sendo que com a inserção de drenos ocorre um aumento médio na EUR de 11,1 e 31,2% nos distintos anos. A ramificação da cultura de canola é afetada pelo excesso hídrico do solo e afeta negativamente a produtividade. Com a ausência de drenagem superficial (SD) ocorreu um aumento do número total de ramos em 21,7 e 62,1%, respectivamente, em 2018 e 2019. A utilização de drenos impactou positivamente o cultivo de canola, principalmente ao se reduzir o excesso hídrico intenso (2018), com 22,0, 469,9, 130,8, 58,7, 1198,1% para, respectivamente, na altura de planta, no número de síliquas, grãos por síliqua, massa de mil grãos e rendimento de grãos. O espaçamento 0,17 m apresentou menor redução do estande final de plantas e maior número de grãos por síliqua. As médias de rendimento de grãos foram de 81,5 e 1090,2 kg ha⁻¹ em SD e de 1237,2 e 2901,1 kg ha⁻¹ em CD, respectivamente, em 2018 e 2019. Nos tratamentos com drenagem os maiores rendimentos de grãos foram observados nos espaçamentos entre linhas de 0,41 m em 2018 e de 0,17 m em 2019. Os resultados deste estudo evidenciam que o cultivo de canola em terras baixas é possível e pode ser rentável mediante a utilização drenagem superficial no solo, sendo necessários espaçamentos intermediários em torno de 0,45 m para resguardar a capacidade produtiva na presença de excesso hídrico no solo.

Palavras-chave: Excesso Hídrico. Radiação Fotossinteticamente Ativa. Drenagem Superficial. Caracteres Produtivos. *Brassica napus* L.

ABSTRACT

CANOLA MANAGEMENT IN LOWLANDS: CANOPY TRAITS, RADIATION INTERCEPTION, AND GRAIN YIELD

AUTHOR: Paulo Eugênio Schaefer
ADVISOR: Arno Bernardo Heldwein

The modification of microclimatic conditions in agricultural crops can substantially affect the growth and yield of grains in waterlogged environments. Therefore, the present study aimed to determine the effect of the modification in the spatial arrangement of plants in a canola canopy grown in Umbric Alithic Dark-Grey Ultisol with and without surface drainage in the Central Depression region of Rio Grande do Sul. The study comprised field experiments conducted in 2018 and 2019 using a randomized block design with strips for the surface soil drainage factor and arranged in a 2 x 4 two-factorial arrangement with four replications. Treatments consisted of the presence and absence of surface drains (drainage factor) and the row spacings of 0.17, 0.34, 0.51, and 0.68 m (spacing factor). The canola cultivar Diamond was used in the experiment at a population density of 40 plants m⁻² after thinning. The drainage grooves measuring 0.25 m in width and depth were opened with a machine around the experimental units. The plants were subjected to phenological evaluations and analyses of growth traits, leaf area, dry matter, final plant density, number of siliques per plant, number of grains per silique, thousand-grain mass, grain yield, and interception parameters of photosynthetically active radiation (PAR). The incident and transmitted PAR on the canopy were measured using handmade sensors containing five amorphous silicon solar cells, with readings every 30 seconds beginning at the rosette stage of the crop. Soil surface drainage (CD) reduced the persistence of water table rise in the soil profile. Waterlogging delayed the necessary plant development to obtain maximum leaf area index (LAI) and the total crop cycle. The highest extinction coefficient of the PAR was obtained at the spacing of 0.17 m, decreasing with the increase in spacing. The radiation use efficiency ranged (EUR) from 1.49 to 3.08 g MJ⁻¹, and the insertion of drains resulted in a EUR of 11.1 and 31.2% in the different years. Canola branching is affected by soil waterlogging, negatively affecting the yield. The absence of surface drainage (SD) increased the total number of branches by 21.7 and 62.1% in 2018 and 2019, respectively. Drainage positively impacted canola cultivation, especially under intense waterlogging conditions (2018), increasing by 22.0, 469.9, 130.8, 58.7, and 1198.1% the parameters of plant height, number of siliques, grains per silique, thousand-grain mass, and grain yield, respectively. The spacing of 0.17 m resulted in the lowest reduction in the final plant stand and the highest number of grains per silique. The grain yield means were 81.5 and 1,090.2 kg ha⁻¹ in SD and 1,237.2 and 2,901.1 kg ha⁻¹ in CD in 2018 and 2019, respectively. In the treatments with drainage, the highest grain yield values were obtained with the row spacings of 0.41 m in 2018 and 0.17 m in 2019. The results of this study highlight that canola cultivation in lowlands is possible and could be profitable in the presence of surface drainage, requiring intermediate spacings around 0.45 m to safeguard the production capacity in the presence of waterlogging.

Keywords: Drains. Waterlogging. Radiation Interception. Production traits. *Brassica napus* L.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 1 – Esquema estrutural das unidades experimentais com a respectiva instalação do piezômetro e barras de RFA abaixo do dossel vegetal de canola. Santa Maria, RS, 202143
- Figura 2 – Precipitação pluviométrica e profundidade do lençol freático na ausência e presença de drenos em Argissolo Bruno-Acinzentado Alítico úmbrico durante o ciclo de cultivo da canola em dias após a semeadura (DAS) anos de 2018 (a) e 2019 (b). Santa Maria, RS, 202150
- Figura 3 – Disponibilidade de radiação solar global diária (R_g) observada durante o cultivo de canola em 2018 e 2019 em Santa Maria, Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 202151
- Figura 4 – Temperatura máxima do ar (—, T_{max}) e temperatura mínima do ar (---, T_{min}) diárias medidas na estação automática do INMET durante os ciclos de cultivo da canola nas safras 2018 (a) e 2019 (b) em Santa Maria, RS e sua relação com as temperaturas cardinais de crescimento (TB: temperatura basal superior, Tot: temperatura ótima, Tb: temperatura basal inferior, CD: sistema de cultivo com drenagem superficial do solo, SD: sem a presença de drenos). Escala fenológica da canola (IRIATE; VALETTI, 2008). Santa Maria, RS, 202153
- Figura 5 – Modelo de ajuste não linear do índice de área foliar (IAF) em função do acúmulo térmico (graus-dia) em 2018 para a inserção de drenagem superficial do solo (CD) e na sua ausência (SD), no cultivo de canola em ambientes com excesso hídrico do solo. Santa Maria, RS, 202161
- Figura 6 – Modelos de ajuste não linear do IAF de canola em função do acúmulo térmico (graus-dia) para semeadura realizada em 06 de junho de 2019 em diferentes espaçamentos e em ambiente com drenagem superficial do solo (a) e sem drenagem na área (b). Santa Maria, RS, 202164
- Figura 7 - Eficiência de interceptação (ϵ_i) da radiação fotossinteticamente ativa em dossel de canola submetida a um sistema de drenagem superficial do solo (a: com drenos, b: sem drenos) e diferentes espaçamentos entre linhas (0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m) em 2018. Santa Maria, RS, 202167
- Figura 8 - Eficiência de interceptação de RFA (ϵ_i) em dossel de canola submetida a diferentes espaçamentos entre linhas (0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m) e sistema de drenagem superficial do solo (a: com drenagem, b: sem drenagem) em 2019 em terras baixas. Santa Maria, RS, 202168
- Figura 9 – Coeficiente de extinção (k , parâmetro angular) da RFA em dossel de plantas de canola submetidos à variação de espaçamento entre linhas de semeadura em sistema com drenagem superficial do solo (---) e sua ausência (—) em 2018 (a: 0,17 m; b: 0,34 m; c: 0,51 m; d: 0,68 m) e 2019 (e: 0,17 m; f: 0,34 m; g: 0,51 m; h: 0,68 m) para a cultura da canola em terras baixas. Santa Maria, RS, 202172
- Figura 10 – Eficiência do uso da radiação (EUR, $g\ MJ^{-1}$), representado pelo coeficiente angular da regressão linear entre a matéria seca da parte aérea (MSPA) e o acúmulo de radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_i) pela canola em sistemas com (a) e sem (b) drenagem superficial do solo para diferentes espaçamentos de 0,17 m, 0,34 m, 0,51 m e 0,68 m no ano de 2018. Santa Maria, RS, 2021.....74

Figura 11 – Eficiência do uso da radiação (EUR), representado pelo coeficiente angular da regressão linear entre a matéria seca da parte aérea (MSPA) e o acúmulo de radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA _i) pela canola em sistemas com (a) e sem (b) drenagem superficial do solo para diferentes espaçamentos entre fileiras de plantas no ano de 2019. Santa Maria, RS, 2021.....	75
---	----

CAPÍTULO II

Figura 12 – Altura de plantas de canola (AP) submetidas ao cultivo com (CD) e sem drenagem superficial do solo (SD) em diferentes espaçamentos entre linhas de semeadura nos anos de ciclo de cultivo 2018 (a) e 2019 (b e c). Santa Maria, RS, 2021.....	93
Figura 13 – Número de ramos secundários (NRS, a), terciários (NRT, b) e quaternários (NRQ, c e d) em ambiente sem (SD) e com drenagem superficial do solo (CD) em diferentes espaçamentos entre linhas de semeadura na safra 2018 com a cultura da canola. Santa Maria, RS, 2021.....	95
Figura 14 – Número de ramos secundários (NRS), terciários (NRT) e quaternários (NRQ) em canola submetida a drenagem superficial do solo (CD) e sua ausência (SD) em diferentes espaçamentos entre linhas de semeadura na safra de 2019. Santa Maria, RS, 2021.....	97
Figura 15 – Número total de ramos por planta (NTR) de canola submetida ao cultivo com (CD) e sem drenagem superficial do solo (SD) em distintos espaçamentos entre linhas (ESP) para os ciclos produtivos de 2018 (a) e 2019 (b). Santa Maria, RS, 2021.....	99
Figura 16 – Densidade de plantas de canola (DP) no momento da colheita, em solos com drenagem superficial (CD) e sua ausência (SD) submetidas a diferentes espaçamentos entre linhas de semeadura em 2018 (a) e 2019 (b). Santa Maria, RS, 2021.....	101
Figura 17 – Número de síliquas por planta de canola (NSP) submetida ao cultivo em ambiente sem (SD) e com a utilização de drenos superficiais (CD) e variação de espaçamento entre linhas de semeadura nas safras 2018 (a) e 2019 (b e c). Santa Maria, RS, 2021.....	103
Figura 18 – Número de grãos por síliqua (NGS, a e b) e massa de mil grãos (MMG, c e d) de canola submetida a diferentes espaçamentos entre linhas de semeadura com (CD) e sem (SD) drenagem superficial do solo em ambiente com déficit de drenagem superficial natural do solo em 2018 (a, c) e 2019 (b, d). Santa Maria, 2021.....	106
Figura 19 – Produtividade de grãos da cultura da canola (PG: a e b) e índice de colheita (IC: c e d) de canola submetida à variação de espaçamento entre linhas de cultivo em ambientes com presença (CD) ou ausência de drenagem superficial do solo (SD) em 2018 (a, c) e 2019 (b, d). Santa Maria, RS, 2021. (ns: não significativo a 5% probabilidade de erro pelo teste de Scott-Knott; r ² : coeficiente de determinação).....	108

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1 – Necessidades térmicas em distintos subperíodos para a cultivar de canola Diamond em 2018 e 2019 em dois sistemas de cultivo: CD (com drenagem superficial do solo) e SD (sem a presença de drenos). Santa Maria, RS, 2021	54
--	----

CAPÍTULO II

Tabela 2 – Coeficientes de correlação fenotípica entre caracteres de crescimento e produtividade da cultura da canola em ambiente de terras baixas submetidas a drenagem superficial do solo (CD) e sua ausência (SD). Santa Maria, RS, 2021	113
--	-----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	ASPECTOS GERAIS.....	23
2.2	CONDIÇÕES CLIMÁTICAS PARA A CULTURA	25
2.3	EXCESSO HÍDRICO NO CULTIVO DE PLANTAS	27
2.4	ARRANJOS DE PLANTAS	31
2.5	INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR COM A SUPERFÍCIE VEGETAL.....	33
2.6	ARQUITETURA DE PLANTAS	35
3	CAPÍTULO I – INTERCEPTAÇÃO E USO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA EM CANOLA SOB MANEJOS DE ESPAÇAMENTO E DRENAGEM SUPERFICIAL DO SOLO	39
3.1	INTRODUÇÃO.....	40
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	42
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
3.3.1	Condições meteorológicas	48
3.3.2	Fenologia da cultura	54
3.3.3	Índice de área foliar	59
3.3.4	Interação da RFA com o dossel	66
3.4	CONCLUSÕES.....	77
3.5	REFERÊNCIAS	78
4	CAPÍTULO II – RESPOSTA DA CANOLA A MODIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CULTIVO EM AMBIENTE SUCEPTIVEL A EXCESSO HÍDRICO	85
4.1	INTRODUÇÃO.....	86
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	89
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
4.4	CONCLUSÃO	114
4.5	REFERÊNCIAS	115
5	DISCUSSÃO	123
6	CONCLUSÕES	129
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
	APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO	141
	APÊNDICE B – MODELO DE AJUSTE NÃO LINEAR PARA IAF EM 2018	143
	APÊNDICE C – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON PARA DISTINTOS CARACTERES EM CANOLA EM DIFERENTES ANOS.....	145
	APÊNDICE D – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PAERSON PARA DISTINTOS CARACTERES EM CANOLA EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS ENTRE LINHAS DE SEMEADURA	146
	APÊNDICE E – QUADRO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS CARACTERÍSTICAS NAS SAFRAS 2018 E 2019	149
	APÊNDICE F – EFEITOS DELETÉRIOS DO EXCESSO HÍDRICO DO SOLO	150
	APÊNDICE G – RAMIFICAÇÃO DE CANOLA SUBMETIDA AO EXCESSO HÍDRICO EM DISFERENTES ESPAÇAMENTOS	152
	APÊNDICE H – RELAÇÃO RFA/Rg EM DOSSSEL DE CANOLA EM TERRAS BAIXAS	154

APÊNDICE I – DISPONIBILIDADE MÉDIA DE RADIAÇÃO SOLAR DURANTE OS MESES DE MAIO A OUTUBRO	156
ANEXO A – ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DA CANOLA.....	158
ANEXO B – DISPOSIÇÃO DOS RAMOS LATERAIS EM CANOLA.....	160
ANEXO C – MODELO NÃO LINEAR UTILIZADO NA DETERMINAÇÃO DO IAF	162

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda mundial por grãos, associado à projeção do aumento da renda per capita, com o aumento populacional geram insegurança alimentar, pressionando o aumento da produção mundial de alimentos (FAO, 2021). No entanto, a gradativa limitação de novas fronteiras agrícolas, já esgotada em muitos países e norteadas pelo clamor de preservação ambiental, determina a necessária otimização do uso das áreas agrícolas atualmente exploradas (SAATH; FACHINELLO, 2018). Muito além das inúmeras vantagens do crescimento vertical da agricultura, isso pode gerar mais renda ao agricultor e movimentar a economia de toda cadeia produtiva associada.

Os solos de terras baixas abrangem 5,4 milhões de hectares no Rio Grande do Sul, onde predominantemente é realizado o cultivo de arroz (UHRY; SILVA, 2019). Porém, estes solos no período entressafra, outono e inverno, permanecem ociosos com plantas de cobertura ou em pousio (FONTOURA JÚNIOR et al., 2020; PARFITT et al., 2020; SILVA; PARFITT, 2004; WINKLER et al., 2018). Assim, novos cultivos podem ser inseridos neste contexto de manejo, auxiliando além da geração do retorno econômico ao produtor, a quebra do ciclo de pragas, doenças e plantas daninhas, e a ciclagem de nutrientes (BRANDLER, 2019; CONCENÇÃO et al., 2020; GOULART et al., 2020).

A utilização de culturas com potencial socioeconômico nestes solos como a canola poderia ser uma alternativa promissora dentro do sistema em sucessão a cultura do arroz e/ou outras culturas de verão, a exemplo da soja. A ótima qualidade nutricional do grão e seus subprodutos (CANOLA COUNCIL OF CANADA, 2021; MICUANSKI, 2014), além da matriz energética associada como fonte renovável de biocombustível e preços similares a cultura da soja, respaldam a importância da cultura da canola no cenário agrícola e sua atratividade aos produtores rurais (GULARTE et al., 2020). Porém, os solos presentes nestes ambientes são caracterizados pela limitação da drenagem natural e saturação hídrica através da elevação do lençol freático (PARFITT et al., 2020; UHRY; SILVA, 2019). De forma associada à menor demanda atmosférica por vapor de água e com chuvas mais frequentes e prolongadas (BORTOLUZZI et al., 2017), ocorrem condições de excesso hídrico no solo para cultivos no inverno. O excesso hídrico periódico do solo

presente em terras baixas durante a exploração das culturas de inverno, geralmente, caracteriza um entrave para um bom crescimento vegetativo e reprodutivo (LIU et al., 2020), e limita a obtenção de elevados rendimentos de grãos em canola (SANTOS et al., 2020).

Com a elevação do lençol freático do solo à superfície, ocorre a supressão dos espaços porosos com ar, limitando assim, principalmente a disponibilidade de oxigênio para o metabolismo aeróbico do sistema radicular das plantas (SILVA; PARFITT, 2004). A limitação parcial (hipoxia) e total (anoxia) de oxigênio no solo, condicionam a alterações morfofisiológicas na planta responsáveis pela síntese de ácido abscísico, etileno e auxinas (BARRERA-ROJAS et al., 2020; BATISTA-SILVA et al., 2019; SILVEIRA et al., 2014), degradação da clorofila foliar (GIBBS; GREENWAY, 2003), fechamento estomático e acúmulo de íons tóxicos. Estas alterações condicionam às plantas a mortalidade de raízes (PLOSCHUK et al., 2020), senescência foliar (GAMALERO; GLICK, 2012; HABIBZADEH et al., 2013; ZHU, 2016), redução da absorção de nutrientes (PLOSCHUK et al., 2020), redução da taxa fotossintética (GIBBS; GREENWAY, 2003), aumento da ramificação lateral (BARRERA-ROJAS et al., 2020), redução do crescimento vegetal (LIU et al., 2020) e dificuldade na absorção de água para atender a transpiração das plantas.

Para a implantação de culturas pouco adaptadas à condição limitante de oxigênio no solo, como a canola (LIU et al., 2014; PLOSCHUK et al., 2021; XU et al., 2015; ZOU et al., 2014), se faz necessária a utilização de técnicas mais aprimoradas de cultivo. A modificação espacial do arranjo de plantas é uma técnica que pode ser utilizada, pois com a modificação do espaçamento entre plantas na linha de semeadura, ocorre uma modificação na interação do dossel das plantas com o ambiente, além da modificação da competição intraespecífica por recursos naturais (KRÜGER, 2011a; KRÜGER, 2011b; KRÜGER et al., 2017; PERUZATTO, 2017; ZOU et al., 2014). A dinâmica da interceptação da radiação fotossinteticamente ativa e a capacidade de expansão de ramos laterais, são duas variáveis influenciadas pelo espaçamento entre plantas, que apresentam relação direta com produção de fotoassimilados, acúmulo de biomassa e expressão dos caracteres produtivos da cultura (KRÜGER et al., 2011a; PETTER et al., 2016).

A drenagem superficial em solos com excesso hídrico também é uma prática essencial para atenuar os efeitos deletérios no crescimento e desenvolvimento de plantas, auxiliando na manutenção do rendimento de grãos. O aumento da aeração

do solo em função da remoção do excesso de água subsuperficial mais rapidamente após os eventos pluviométricos, além da redução na elevação do lençol freático no perfil do solo por meio dos drenos, interfere diretamente na integridade da área foliar. Assim, favorece a relação fonte e dreno, melhora a eficiência do uso da radiação e a expressão dos caracteres produtivos (LIU et al., 2020; PLOCHUK et al., 2018; WOLLMER et al., 2018).

Os diferentes espaçamentos podem condicionar respostas diferentes em ambientes com excesso hídrico em relação aos solos bem drenados. Mas ainda são limitadas as informações sobre qual arranjo de plantas proporciona melhor desenvolvimento a cultura da canola neste sistema e o efeito da drenagem do solo nas alterações dos componentes indiretos e diretos de rendimento da cultura da canola. Diante disso, os objetivos deste estudo foram:

- (i) Quantificar o efeito da drenagem superficial em solos com excesso de umidade do solo e do espaçamento entre linhas de plantas sobre a capacidade de interceptação e uso da radiação fotossinteticamente ativa;
- (ii) Entender como o excesso hídrico do solo afeta o desenvolvimento de canola em ambiente de terras baixas;
- (iii) Avaliar as possíveis alterações ecofisiológicas nas plantas de canola como resposta à técnica da drenagem superficial do solo e seus efeitos nos componentes de rendimento e na produtividade de grãos;
- (iv) Compreender a influência da modificação do espaçamento entre linhas de semeadura em solos com excesso de umidade na produtividade de grãos em canola.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS GERAIS

A canola (CANadian Oil Low Acid) é um acrônimo conferido à oleaginosa de ciclo anual *Brassica napus* L., pertencente à família Brassicaceae, oriunda do melhoramento genético de cultivares de colza. Seus grãos possuem cerca de 24 a 27% de proteína e 40 a 46% de óleo (TOMM, 2007). Quando os subprodutos dos grãos, apresentam baixos teores de ácido erúxico (< 2,0%) e menos que 30 micromoles de glucosinolatos (CANOLA COUNCIL OF CANADA, 2021) é possível lhe conferir a denominação de “canola”. Seu beneficiamento é empregado na produção de óleo destinado a alimentação humana (gorduras mono-insaturadas, ômega-3, vitamine E), bioenergia (biodiesel) e a obtenção de subprodutos como farelo de canola destinado para a alimentação animal (DE MORI; TOMM; FERREIRA, 2014; SHARAFIZADEH et al., 2012).

A canola é considerada a terceira oleaginosa em produção mundial de alimentos. Difundida em todos os continentes, em 2020 atingiu uma produção de grãos de 70,5 milhões de toneladas numa área de cultivo aproximada de 34 milhões de hectares, com produtividade média de 2071,9 kg ha⁻¹ (FAO, 2021). No Brasil, o cultivo pioneiro de colza começou no Rio Grande do Sul na década de 70 e é realizado até os dias atuais em maior proporcionalidade dentro do cenário nacional com genótipos de canola de primavera (GULARTE; MACEDO; PANOZZO, 2020). Em 2020, no Rio Grande do Sul foram semeados 34,8 mil hectares com rendimentos médios de grãos de 901 kg ha⁻¹ (CONAB, 2021).

Agronomicamente, a canola é uma planta que apresenta hábito de crescimento indeterminado, com um caule ereto de porte elevado, alcançando 0,5 a 1,8 m de estatura (ESTEVEZ et al., 2014; GULDEN et al., 2008). O sistema radicular tem raiz principal pivotante com grande concentração de raízes fasciculadas (ESTEVEZ et al., 2014; LIU et al., 2010), sendo que 80% das raízes desenvolvem-se nos primeiros 0,2 m do perfil do solo (GAN et al., 2009). A emissão de ramos laterais a partir das gemas axilares, é modulada pela plasticidade fenotípica presente na cultura, onde condições ambientais e genéticas estão diretamente associadas na sua expressão (KRÜGER, 2011; KRÜGER et al., 2011b; KRÜGER et al., 2017; PLOSHUK et al., 2018). As folhas de tonalidade verde azulada escura se alternam conforme o estágio de desenvolvimento da cultura (TARTAGLIA et al., 2016), sendo

pecioladas no subperíodo de roseta (medem de 0,05 a 0,20 m e são ovais a alongadas de pecíolo curto) e após este período as novas emissões são de folhas lanceoladas, as quais abraçam parcialmente as hastes da planta (semi-amplexiformes) (GULDEN et al., 2008). Em média, 26 folhas expansivas são observadas na máxima expansão foliar da planta de canola (TARTAGLIA, 2016; TARTAGLIA et al., 2018).

As flores são agrupadas em rácemo, com dimensão pequena, coloração amarelada, constituídas por quatro pétalas dispostas em forma de cruz, seis estames e o pistilo. Durante a antese, o florescimento acontece da base para o ápice do ramo floral, com a emissão de inúmeras flores, dentre quais, apenas 40 a 50% das flores emitidas acabam formando síliquis, sendo as demais naturalmente abortadas (IRIARTE; VALETTI, 2008). Os frutos, denominados de síliquis, medem de 0,05 a 0,06 m de comprimento e 0,004 m de espessura, com concentração média de 260 síliquis por planta (KRÜGER et al., 2011a). Os grãos formados dentro das síliquis estão dispostos em fileira, possuem dimensão aproximada de 1 a 2 mm de diâmetro e na maturação fisiológica sua coloração compreende do marrom avermelhada a preta, com massa de mil grãos variando de 2,5 a 6,0 g (GARCÍA, 2007). O número total de grãos formados por síliqua é afetado tanto por fatores genéticos da cultura quanto pelas condições ambientais (KIRKEGAARD et al., 2018; LIU et al., 2016).

O desenvolvimento da cultura da canola é classificado em diferentes subperíodos, delimitados pelas fases como a germinação, emergência, plântula, roseta, alongação do ramo floral, florescimento e maturação fisiológica (IRIARTE; VALETTI, 2008). A temperatura do ar e o fotoperíodo são as variáveis de maior associação na determinação do desenvolvimento da canola e de seus subperíodos. A relação linear existente entre a temperatura do ar e a duração dos distintos subperíodos é negativa (LUZ et al., 2012). Isso torna a mensuração da soma térmica para a canola de primavera uma variável importante para diferenciar a duração dos diferentes subperíodos do desenvolvimento de canola (DALMAGO et al., 2009).

Embora o fotoperíodo e a temperatura do ar sejam as principais variáveis que atuam sobre a duração dos subperíodos e ciclo da cultura, vários outros fatores bióticos e abióticos podem interferir no desenvolvimento da canola, dentre eles a radiação solar (KRÜGER et al., 2017), o arranjo de plantas (KRÜGER et al., 2011a) e a disponibilidade hídrica (NABLOUSSI et al., 2019).

2.2 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS PARA A CULTURA

A cultura da canola é considerada uma planta de estação fria típica de regiões de clima temperado ameno, não excessivamente frio, caracterizando-a como uma cultura promissora para a produção de grãos e planta de cobertura do solo nestes períodos, na região Sul do Brasil. Seu desenvolvimento é favorecido com temperaturas médias do ar para todo ciclo em torno dos 20°C (THOMAS, 2014). Na fase vegetativa, esta temperatura pode variar até 13 °C, não ocasionando problemas no crescimento da cultura, mas níveis de temperatura do ar abaixo de 5,0 °C cessam parcialmente ou totalmente o crescimento da planta (LUO et al., 2019; PASINATO et al., 2014; XIN et al., 2019).

Temperaturas do ar muito baixas geralmente são associadas às geadas, na qual os estádios mais sensíveis das plantas são o desenvolvimento inicial e a antese, quando podem causar muitos prejuízos para a cultura (YAN et al., 2019). No subperíodo entre emergência e roseta, baixas temperaturas podem levar à danos ao desenvolvimento (DALMAGO et al., 2010, XIN et al., 2019; ZHANG et al., 2015), sendo a sensibilidade também influenciada pela aclimação gradual das plantas de canola ao frio nos dias anteriores a geada (DALMAGO et al., 2010). No subperíodo da emergência até o estágio de 4 folhas (V4), se encontra a fase da maior sensibilidade da cultura, quando temperaturas em torno de -3 a -4°C causam morte das plantas (DALMAGO et al., 2010; FIEBELKORN; RAHMAN, 2016; JAN et al., 2017; KOVALESKI, 2015; KOVALESKI et al., 2020), embora manejos como o afastamento da palha em cerca de 0,05 m da fileira de plantas possa amenizar parcialmente o resfriamento das plântulas e os danos (KOVALESKI, 2015; KOVALESKI et al., 2020).

Após 30 dias desde a emergência, as plantas se tornam menos sensíveis aos danos por frio intenso, passando a apresentar aumento de sensibilidade com o crescimento do rácemo floral (DALMAGO et al., 2010, KOVALESKI, 2019). Na fase reprodutiva, durante os estádios de florescimento e início do enchimento dos grãos, a ocorrência de geada pode causar perdas de produtividade, pois a cultura possui um período relativamente longo de florescimento (que pode chegar a 55 dias), reduzindo o número de síliquas por planta e de grãos por síliqua (DALMAGO et al., 2010; KOVALESKI, 2019; KOVALESKI et al., 2019; TOMM, 2007).

Altas temperaturas do ar também são prejudiciais para a cultura da canola, principalmente durante a antese. Temperaturas de 27°C ou acima no estágio do florescimento causam abortamento floral e esterilidade do pólen (BATISTI et al., 2013). Outro efeito associado às temperaturas altas é a redução do ciclo da cultura, especialmente na fase reprodutiva, entre os estádios de florescimento e enchimento de grãos, repercutindo diretamente na redução de produtividade da cultura (FORAJI et al., 2009).

A radiação solar é outro elemento meteorológico importante para a cultura da canola, associada diretamente aos processos de crescimento, desenvolvimento e reprodução das plantas (KRÜGER et al., 2011a). A transformação da radiação solar pelo processo da fotossíntese em energia química é fundamental para os processos de desenvolvimento da planta, alongação de haste e ramificações, expansão foliar, florescimento e enchimento de grãos (CASAROLI et al., 2007).

A maior parte da radiação solar incidente sobre a superfície das folhas não é aproveitável pela planta, visto que é composta por comprimentos de ondas eletromagnéticas fora da amplitude absorvida pelos vegetais, principalmente por seus pigmentos (BERGAMASCHI; BERGONCI, 2017). Existem ainda outros processos de perda de radiação fotossintética ativa, tais como os de reflexão e mecanismos de aquecimento da planta (MONTEITH, 1994). Menos de 5% da radiação solar incidente na superfície terrestre é destinada aos processos de fixação orgânica de energia (carboidratos) por meio dos pacotes energéticos oriundos da radiação solar (TAIZ; ZIEGER, 2013), havendo também diversidade dessa capacidade entre as espécies.

A variação da eficiência no uso dos pacotes energéticos (fótons) é variável entre as espécies de plantas, sendo condicionada principalmente por diferentes características fisiológicas (mecanismos de fixação do carbono) e ecofisiológicas de adaptação para atenuar estresses e morfológicas, como anatomia foliar (PETTER et al., 2016). Assim, o manejo do arranjo espacial de plantas, como alteração do espaçamento entre plantas, disposição e densidades de plantas pode influenciar as condições de aproveitamento desta energia fotossintética (FONTANA et al., 2012; KRÜGER et al., 2011a; KUNZ et al., 2007). Tal manejo pode alterar a organização da arquitetura e estruturação da parte aérea das plantas na competição por espaço e radiação solar no dossel. Para a cultura da canola, a máxima interceptação da radiação sob diferentes condições ambientais ainda é pouco caracterizada e

esclarecida, sendo encontrados valores distintos, conforme verificado por Edwards e Jensen (2011) e Nied (2013), respectivamente, para o índice de área foliar 4,0 e 1,9.

Sobre o crescimento e desenvolvimento da cultura da canola ainda incidem outros elementos meteorológicos importantes, como umidade do ar e a velocidade do vento. A umidade e a temperatura do ar são elementos meteorológicos associados principalmente às trocas gasosas e energéticas, como a evapotranspiração e o molhamento foliar. Dentre esses, o molhamento foliar pela condensação da umidade do ar sobre a superfície foliar, formando o orvalho, as chuvas, a irrigação e ou formação por processos biofísicos, tem grande importância na epidemiologia de fitopatógenos em plantas, principalmente, pela sua duração sobre as folhas e demais órgãos da parte aérea (DALMAGO et al., 2015; MARCUZZO; REIS, 2016).

O vento por sua vez, interfere diretamente na presença e duração de molhamento foliar. A duração do molhamento foliar está inversamente relacionada à renovação do ar ao redor das folhas, através dos fluxos gasosos e de energia associados ao movimento e renovação à camada de ar saturado adjacente à folha, removendo mais rapidamente a umidade nela presente (DURIGON; VAN LIER, 2013). O vento ainda participa dos processos transpiratórios da planta e de fixação do carbono, vitais para o crescimento e desenvolvimento das plantas (TAIZ et al., 2017), pois dependendo da sua velocidade pode favorecer ou diminuir a transpiração e a absorção de CO₂.

2.3 EXCESSO HÍDRICO NO CULTIVO DE PLANTAS

A necessidade hídrica da cultura da canola varia entre 312 a 500 mm durante seu ciclo (DOGAN et al., 2011; TOMM, 2009). Entretanto, tanto o déficit quanto o excesso hídrico prejudicam o desenvolvimento, o crescimento e a produtividade das plantas de canola (TOMM, 2007). O déficit de umidade do solo reduz a duração do período vegetativo da cultura, especialmente nos estádios de florescimento e enchimento de grãos, resultando em perda de qualidade de seu óleo, havendo elevação de teor dos ácidos graxos insaturados (KAMKAR et al., 2011; MOHAMMADI; ROKHZADI, 2012).

O excesso hídrico, por outro lado, também ocasiona problemas à cultura da canola, tal como ocorre na maioria das plantas cultivadas. Mas, por vezes esse problema pode passar despercebido. Quando as plantas ficam submetidas ao

excesso de água no solo, estas cessam o crescimento radicular e, posteriormente, o da parte aérea (ZOU et al., 2014). Esta limitação ao crescimento decorre da restrição da difusão do oxigênio ao sistema radicular para o metabolismo respiratório das raízes, tendo em vista a ocupação do espaço dos macroporos e microporos do solo com água. Esta característica está atrelada à extrema lentidão na difusão do oxigênio em água e, quando associados a temperaturas superiores a 20°C, o consumo pelas raízes, microrganismos e fauna do solo esgota a concentração do gás em tempo inferior a 24 horas (TAIZ et al., 2017).

Já, na ocorrência de períodos curtos de excesso hídrico também ocorre uma redução parcial da concentração do gás oxigênio no solo, sendo esta denominada como hipóxia (TAIZ; ZEIGER, 2013). Esta situação de excesso hídrico é frequente nos cultivos de canola no Rio Grande do Sul, por ser realizada em uma condição de cultivo com baixa demanda evaporativa hídrica da atmosfera e frequentes precipitações (TARTAGLIA, 2016). Em solos com inundação temporária e/ou também prolongada, a translocação do oxigênio da superfície radicular para as células do centro da raiz, ocasiona uma pressão de oxigênio crítica, na qual sem fonte externa de oxigênio (anoxia), reduz a síntese de ATP, inativa o metabolismo bioquímico e, por fim, resulta na morte celular (TAIZ et al., 2017).

Com a deficiência do oxigênio sob excesso hídrico no solo, ocorre a substituição do metabolismo aeróbico pelo anaeróbico. Nesta condição ocorre o acúmulo de íons tóxicos para a planta, como os radicais oxireduzidos de Mn^{2+} , Fe^{2+} , N_2O , H_2S e, especialmente em solos com concentração alta de matéria orgânica, também ocorre a formação de ácido acético e ácido butírico, ambos prejudiciais às plantas quando absorvidos em concentrações altas (PONNAMPERUMA, 1972; TAIZ et al., 2017). Sob excesso hídrico prolongado, a taxa de assimilação de fotoassimilados pode ser reduzida entre 65 à 97% (GIBBS; GREENWAY, 2003).

Para contornar os efeitos prejudiciais do excesso hídrico, as plantas desenvolvem alterações morfofisiológicas e morfoanatômicas (AHMED et al., 2020, LIU et al., 2020). A formação de estruturas especializadas em algumas plantas como aerênquimas, lenticelas, raízes adventícias e rizomas, lhes possibilita suportar períodos mais prolongados de excesso hídrico, assim como habitarem ambientes inundados permanentemente (TAIZ et al., 2017; ZHOW et al., 2020).

Outro mecanismo desenvolvido pelas plantas é o fechamento estomático devido à restrição da absorção de água pelo sistema radicular com a limitação de

oxigênio no solo, reduzindo a perda de água para a atmosfera pela demanda transpiratória, mesmo em condição com disponibilidade de alto potencial hidráulico da água no solo (ZHOU; LIN, 1995). Outras limitações associadas ao excesso hídrico estão ligadas à síntese de etileno, redução da taxa fotossintética devida à redução de entrada CO₂ e limitação de água, síntese maior de ácido abscísico, degradação da clorofila foliar (GAMALERO; GLICK, 2012; GIBBS; GREENWAY, 2003; HABIBZADEH et al., 2013; ZHU, 2016).

A deficiência de oxigênio no solo, resultante do alagamento, e a condição de excesso hídrico subsequente por saturação do solo, induzem à supressão do metabolismo respiratório das raízes e reduzem a assimilação de carbono e a absorção de água e nutrientes (KOZLOWSKI, 1997; KREUZWIESER; PAPADOPOULOU; RENNENBERG, 2004).

Em relação a canola, pode-se inferir que o problema causado pelo excesso de água no solo pode ser limitante à produção, mas pode ser mitigado parcialmente com manejo adequado do solo e genótipos mais tolerantes. Estudos realizados no continente asiático (GUO et al., 2020; LIU et al., 2020; XU et al., 2015; ZAMAN et al., 2019; ZHOU et al., 2014; ZOU et al., 2015) concluíram sobre a grande suscetibilidade da planta de canola ao encharcamento do solo, sendo três dias suficientes para serem observadas perdas produtivas da cultura. No Brasil, Tartaglia (2016) constatou que em 24 horas sob condição de excesso hídrico já ocorreu redução na velocidade de emergência e estabelecimento da cultura, massa seca da parte aérea, número de síliquas e rendimento de grãos.

A estatura de planta é outra variável afetada pelo excesso hídrico, ocasionando redução de 10% (TARTAGLIA, 2016) até mais de 50% em plantas de canola (ZOU et al., 2014), sendo o número de ramos também reduzido neste patamar. O início do florescimento é considerado um dos períodos mais críticos para estresses por excesso hídrico (TARTAGLIA et al., 2018). Xu et al. (2015) em avaliação do excesso hídrico de cultivo a campo com canola durante 7 dias consecutivos no florescimento, constataram redução da produtividade média em 20%. Tartaglia (2016) também verificou perdas, obtendo produtividades de até 1500 kg ha⁻¹, o que permite inferir que áreas com excesso hídrico temporário, tais como as terras baixas, por vezes denominadas de várzeas no Rio Grande do Sul (RS), tem potencial de aproveitamento para o cultivo da canola.

A maioria das áreas ocupadas por planícies, principalmente as terras baixas que margeiam os rios e, portanto, são naturalmente inundáveis, ocorrem nas regiões tropicais e subtropicais. Estima-se que, na América do Sul, tem-se cerca de dois milhões de km² de áreas inundáveis (JUNK, 1993). Conforme Miura et al. (2015), as terras baixas abrangem 46% da área estadual do RS, atribuindo-se o conceito por critérios de classificação geomórficos a 23,3%, agrônômicos a 14,7% e substrato-vegetacionais a 8,25% do território. Assim, um total de mais de 5 milhões de hectares, dos quais cerca de 19% são cultivados com arroz a cada ano, também poderiam ser cultivados no inverno, sendo a canola uma possível opção. Porém, são necessários manejos que melhorem a drenagem superficial e ocorra escoamento mais rápido da água acumulada na superfície nos períodos de chuva excessiva no outono-inverno do RS (SILVA; PARFITT, 2004).

Zhou e Lin (1995) verificaram que a saturação de água no solo nas fases de plântulas e de botões florais da canola diminuiu o teor de clorofila de folhas, as atividades da desmutase de superóxido e da catalase, induz ao acúmulo de malondialdeído nas folhas e a produção de etileno, reduzindo a taxa fotossintética da folha e oxidabilidade das raízes. Confirmam que a função fisiológica das plantas foi retardada durante o tempo de alagamento, e seu efeito adverso persistiu após drenagem do excedente hídrico. Em consequência, o crescimento vegetativo, o número de síliquas, o número grãos por síliqua diminuíram e a produtividade de grãos foi reduzida em 21,3% e 12,5% em resposta ao alagamento nas fases de plântula e botão floral, respectivamente. Parte desses resultados foram confirmados por Perboni (2011) em clima subtropical (Pelotas) ao verificar que a submissão da canola ao alagamento dos 45 aos 51 dias após a semeadura reduziu a área foliar, massa seca de raízes e parâmetros fotossintéticos.

Embora a canola não apresente capacidade significativa de desenvolver estratégias morfofisiológicas para superação, pelo menos parcial, do estresse imposto pela saturação hídrica do solo, os resultados obtidos por Zhou e Lin (1995), Xu et al. (2015) e Tartaglia et al. (2018) permitem inferir ser possível cultivar canola em solos sujeitos a períodos intermitentes dessa condição hídrica, desde que se aprimore as técnicas que possam atenuar significativamente essa condição.

2.4 ARRANJOS DE PLANTAS

O arranjo espacial de plantas é caracterizado pela distribuição geométrica das mesmas no plano horizontal, alterando-se o espaçamento entre linhas de semeadura e ou a distância entre plantas na linha de cultivo (KRÜGER et al., 2011a; KRÜGER et al., 2014). Com a possibilidade da variação no arranjo de plantas se almeja a ocupação ideal do espaço circundante à cada planta, ajustando a melhor condição de competição intraespecífica e melhorando a competição interespecífica das plantas cultivadas em detrimento às indesejadas, otimizando o aproveitamento dos recursos ambientais pelas plantas cultivadas (KUNZ et al., 2007; STRIEDER et al., 2008). A sua alteração, se bem ajustada ao ambiente, tem efeito direto sobre o desenvolvimento das plantas (duração das fases e estádios), trazendo alterações morfológicas, melhorando a expressão produtiva dos componentes de rendimento e na produtividade final da cultura, bem como na qualidade de grãos (SHAHIN; VALIOLLAH, 2009).

Com a variação no arranjo de plantas ocorrem também modificações micrometeorológicas no espaço tridimensional do dossel das plantas, tais como de interceptação da radiação solar, dos fluxos convectivos e advectivos, da pressão do vapor da água no ar, duração do molhamento foliar e a temperatura do ar (DALMAGO et al., 2015). A interceptação da radiação solar e o coeficiente de extinção da radiação solar no dossel vegetativo são variáveis muito influenciadas pelo espaçamento entre plantas. Em maiores densidades de plantas na linha, pouca radiação fotossinteticamente ativa alcança as folhas do extrato inferior e, em decorrência disto, a senescência foliar neste extrato é acelerada (LIU et al., 2016).

A disponibilidade de radiação solar nos extratos inferiores das plantas é proporcionalmente muito menor do que a incidente no topo do dossel. Isso condiciona um estado energético insuficiente para a rápida evaporação da água nos níveis inferiores do dossel. Portanto, o período de molhamento foliar é mais prolongado no terço inferior do dossel, principalmente em áreas com solos naturalmente mal drenados, onde a pressão de saturação do vapor de água é mais alta perto da superfície do solo e favorece o maior acúmulo e duração do molhamento foliar nas folhas próximas ao solo (DALMAGO et al., 2015). A duração do molhamento foliar é muito discutida nos processos epidemiológicos (BRAND et al., 2018; HOPPMANN; WITTICH, 1997; RADONS et al., 2021; TRENTIN et al.,

2009), sendo mais intenso em dosséis de plantas bem adensadas (DURIGON; VAN LIER, 2013).

O perfil do saldo de radiação no dossel de plantas tem associação direta aos componentes indiretos de rendimento (altura de plantas, arquitetura das partes aéreas no dossel de plantas e área foliar) e, pela sua magnitude, determina diferentes regimes de temperatura e umidade do ar dentro do dossel das culturas (MONTEITH, 1994). Conforme Tazzo et al. (2008), em cultivo de batata, no período diurno, a temperatura do ar é maior nos níveis inferiores do dossel de plantas, sendo estes gradientes de temperatura mais acentuados em relação aos do período noturno, principalmente nos horários de maior saldo de radiação.

Neste sentido, as condições micrometeorológicas são influenciadas pelas alterações na arquitetura do dossel como resultado da modificação do arranjo de plantas que podem ocorrer nas diferentes espécies agrícolas, afetando a adaptabilidade e a estabilidade para o rendimento de grãos (SILVEIRA et al., 2010). Para a cultura da canola, a redução do espaçamento proporciona maior produtividade, especialmente em semeaduras precoces (LIU et al., 2014). Apesar da cultura da canola apresentar característica de plasticidade, ou seja, a capacidade de compensar falhas ou espaços com a emissão de ramos e folhas, espaçamento em torno de 0,20 m aumenta o número de síliquas e de grãos por planta (KRÜGER et al., 2011b). Para Tomm (2007) e Chavarria et al. (2011), densidades de 40 a 45 plantas por m², associadas a espaçamentos reduzidos entre linhas, de 0,17 m (VOLPE, 2008), são a configuração ideal da distribuição no dossel de plantas de canola, pois apresentam aproveitamento superior das disponibilidades de elementos meteorológicos e redução de competição intraespecífica, repercutindo em melhores rendimentos de grãos e óleo.

Outros estudos com a cultura da canola resultaram como melhores espaçamentos entre linhas de semeadura entre 0,12 e 0,20 m. Em região de clima mediterrâneo no Iran, com alta disponibilidade de radiação solar, Shahin e Valiollah (2009) obtiveram as maiores produtividades de grãos para densidades de 4 kg ha⁻¹ de sementes distribuídas em linhas de semeadura espaçadas em 0,12 m entre si. Conforme Santos, Lhamby e Dias (1990) e Bandeira, Chavarria e Tomm (2013), os componentes de rendimento da cultura sofrem redução linear com o aumento do espaçamento de semeadura entre fileiras de plantas, sendo que os espaçamentos de 0,18 e 0,20 m apresentaram componentes de produtividade superiores.

Estudos com alteração do arranjo espacial de canola na avaliação de componentes indiretos de rendimento, como alterações morfológicas na emissão de ramos (número e tamanho) e área foliar, ainda são escassos. Para Krüger et al. (2011b), espaçamentos maiores como o de 0,60 m proporcionam maior área disponível para as plantas de canola expressar sua morfologia e seu poder compensatório no rendimento de grãos de canola por planta. Tourino et al. (2002) e Rambo et al. (2003) estudando outra cultura oleaginosa, a soja, verificaram um aumento no número de nós férteis, mais legumes por área, além da maior resistência ao acamamento de plantas quando semeados em espaçamento maiores.

2.5 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR COM A SUPERFÍCIE VEGETAL

A radiação solar é a fonte de energia que as plantas utilizam para realizarem todos seus processos fisiológicos e bioquímicos (TAIZ et al., 2017). Dentre os principais, estão os processos fotoenergético e de fotoestímulo, que estão diretamente associados à produção de biomassa e desenvolvimento vegetal (BERGAMASCHI; BERGONCI, 2017). Os processos de fotoestímulo estão associados à formação e movimento vegetal, como fototropismo, indução floral, biossíntese de pigmentos fotossintéticos e metabólitos secundários. Já a fotossíntese é o principal processo envolvido no ecossistema responsável pela conversão de pacotes energéticos em matéria orgânica (EDWARDS; HERTEL, 2011).

O sol é a fonte mais importante na emissão de energia que incide sobre na superfície terrestre. Esta radiação solar global chega à superfície terrestre através de ondas eletromagnéticas nos comprimentos de onda entre 0,3 a 4 μ m (SOUZA FILHO, 2008). Mas as plantas através de seus pigmentos aproveitam apenas uma fração deste amplo espectro eletromagnético, absorvendo radiação na faixa espectral da luz visível compreendida entre 0,38 à 0,75 μ m (FONTANA et al., 2019), faixa conhecida como radiação fotossinteticamente ativa (RFA).

No desenvolvimento vegetal e determinação da capacidade produtiva das plantas, a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) é considerada a fração mais importante dentro do espectro eletromagnético, pois está diretamente associada ao processo fotossintético vegetal (DALMAGO et al., 2015). Este processo biofísico é responsável pela produção da energia química fundamental para ser utilizada nos processos de crescimento e desenvolvimento da planta, alongação de haste,

expansão foliar, florescimento e enchimento de grãos (CASAROLI et al., 2007; PILAU; ANGELOCCI, 2015). Em ambientes sem limitação de recursos naturais como água e nutrientes, a RFA é o principal elemento responsável pela determinação do potencial de produção e acúmulo de biomassa (MONTEITH, 1977).

O uso efetivo da radiação solar pelo dossel vegetal não está associado somente à sua disponibilidade, mas também na capacidade de sua interceptação (KUNZ et al., 2007; KRÜGER et al., 2011a; PETTER et al., 2016). Neste sentido, características morfofisiológicas da planta, densidade de plantas e arranjo espacial são fundamentais para a interação dos dosséis vegetais com a RFA (DALMAGO et al., 2018; FONTANA et al., 2012; KRÜGER et al., 2011b). Dentre as características morfológicas, o índice de área foliar (IAF) caracteriza-se como a principal componente do dossel para a interação com a radiação solar incidente (NIED, 2013; PILAU; ANGELOCCI, 2015). Porém, outras estruturas como ramos e síliquas podem também estar relacionados à interceptação de RFA e conferir produção de fotossintatos na planta (FOCHESATTO et al., 2016).

Assim, a capacidade produtiva das culturas é um reflexo da eficiência de interceptação da RFA, dada à correlação direta entre rendimento de grãos com a eficiência fotossintética (PETTER et al., 2016). A modificação nas condições de crescimento e desenvolvimento das plantas, através da alteração do manejo cultural, como, por exemplo, a densidade de cultivos e arranjo espacial, conferem condições de alteração da interação vegetal com a RFA, podendo ocasionar o encurtamento do período para que a cultura intercepte o máximo de RFA por unidade de área e tempo (FONTANA et al., 2012). Além disso, a modificação do arranjo espacial de plantas confere influência direta na arquitetura das plantas, condicionando padrões diferenciados em resposta aos variados espaçamentos para a maneira como é interceptada a radiação solar pela distribuição da área foliar (KUNZ et al., 2007).

Para a cultura da canola, estudos realizados mostram que a máxima eficiência de interceptação da RFA em dossel ocorre em 90% (EDWARDS; HERDEL, 2011), 94% (NIED, 2013), 90% (KUAI et al., 2015), 75% (FOCHESATTO et al., 2016), 95% (RONDANINI et al., 2017) e 93% (DALMAGO et al., 2018). No entanto, esses valores foram obtidos em condições distintas de espaçamentos entre linhas, densidades de plantas, cultivares e latitudes. Assim, ainda se carece de informações mais detalhadas na literatura sobre o efeito de diferentes condições ambientais, e qual a resposta da modificação do arranjo espacial neste cenário.

2.6 ARQUITETURA DE PLANTAS

A espécie *Brassica napus* possui uma forma de crescimento ereto no qual, a partir da haste principal e de cada ramo, podem ser emitidas novas ramificações, gerando ramos laterais de segunda, terceira e quarta ordem. São respostas hormonais ou bioquímicas que comandam este processo e estão diretamente associadas às condições ambientais às quais as plantas estão expostas (BARRERA-ROJAS et al., 2020). Assim, a variação do estande de plantas com mudança na conformação do espaçamento entre linhas bem como o espaçamento entre plantas na mesma linha de semeadura, confere distintas condições de crescimento e desenvolvimento que atuam na conformação final da arquitetura da planta.

A arquitetura de plantas é a organização dos componentes das plantas no espaço aéreo, que pode mudar com o tempo, em função do crescimento e do desenvolvimento das plantas, interferindo na capacidade produtiva das culturas (LIU et al., 2014). Segundo Godin (2000), a arquitetura de plantas pode ser definida pela geometria e topologia de suas estruturas. A geometria consiste na forma, tamanho, orientação e localização espacial dos componentes arquitetônicos, influenciando no aproveitamento de recursos ambientais. A topologia caracteriza as conexões físicas entre os componentes da parte aérea da planta (GODIN, 2000).

No caso da soja ocorre crescimento por metâmeros, que são estruturas que consistem em um entrenó, uma folha trifoliada, uma gema lateral e estruturas que podem se desenvolver por diferenciação da gema. Nessa mesma conformação pode ser inserido o tipo de caule e folha da canola, bem como de que forma estes órgãos surgem (SHARGHI; BAGHERI, 2011; SHROYER, 1980).

Em soja, as características como estrutura de planta, número de ramificações, área foliar, orientação e posição das folhas, comprimento da haste principal, flores e frutos são geneticamente controlados, podendo ser alterados pelo efeito do ambiente e intervenções humanas (MULLER, 2017). Essas expressões morfológicas podem apresentar certo grau de alteração em função do arranjo das plantas, densidade de plantas, época de semeadura, além da influência de manejos como irrigação, adubação e danos por estresses físicos e bióticos.

Na canola ocorrem alterações na morfologia e nos componentes do rendimento em resposta às variações na densidade de semeadura, obtendo-se

melhor rendimento de grãos com uma população de 25 plantas m^{-2} (pl m^{-2}), em relação 36 e 18 pl m^{-2} , em Madri, Espanha (JACOB JUNIOR et al., 2012). Estes autores verificaram que o número de siliquas por planta foi o componente que mais influenciou no aumento da produtividade por planta e por área e que a distribuição espacial das sementes na planta, bem como a variação da densidade de semeadura entre 18 e 36 pl m^{-2} não afetam a qualidade fisiológica das sementes produzidas. Esses resultados podem ser interpretados como não conclusivos, pois a canola é denominada como uma “cultura flexível ou plástica”. Isso porque cada planta, na sua ocupação de espaço em relação às demais no dossel, responde formando ramificações e siliquas em maior ou menor número e o tamanho em função das disponibilidades de água, radiação e nutrientes que efetivamente possa captar em competição com as demais plantas (CANOLA COUNCIL OF CANADA, 2021). Portanto, a canola naturalmente compensa alterações, tendo faixas de densidade de plantas relativamente amplas com pouco efeito sobre o rendimento final, principalmente na ausência de estresses em climas temperados, de maior latitude em relação a Madri, geralmente mais favoráveis ao cultivo da canola.

No Canadá, com 70 a 100 pl m^{-2} , as plantas de canola geralmente produzem de três a cinco ramificações, mas com densidades de 20 a 30 pl m^{-2} , consideradas baixas, podem produzir até quatro vezes mais ramificações. Com o aumento da densidade de plantas no dossel, haverá menor produção de massa de matéria seca por planta, hastes mais finas, menor ramificação e menos sementes por planta, devido a competição intraespecífica. Mas, a maior densidade de plantas compensa a menor produção individual e, geralmente a produtividade de grãos resulta semelhante entre as populações 50 a 200 pl m^{-2} , enquanto densidades ainda maiores resultam em hastes muito finas, susceptíveis a acamamento, e com siliquas apenas no ápice das hastes, reduzindo a produtividade (CANOLA COUNCIL OF CANADA, 2021). Mesmo assim, verifica-se que as menores densidades de plantas adotadas para o Canadá são todas superiores às recomendadas para a região Sul do Brasil (TOMM et al., 2009). Porém, deve ser lembrado que no período de floração e enchimento de grãos no Canadá, na primavera-verão, ocorre disponibilidade de radiação solar diária significativamente maior do que no outono-inverno do Sul do Brasil onde a formação de ramos, floração e enchimento de grãos ocorre no período de final de outono e durante o inverno, conforme varia a data de semeadura. Por

isso, dificilmente ocorre no RS a formação de mais de dois ramos produtivos, além da haste principal.

Sob condições de estresses abióticos, principalmente, sob efeito de estresses hídricos, as respostas arquitetônicas das plantas de canola podem ser ainda mais afetadas, pois as plantas ficam expostas a uma competição maior por água e, assim, não conseguem expressar todo seu potencial genético de crescimento e desenvolvimento. Na região da pradaria semiárida do Canadá, Angadi et al. (2003), trabalhando com densidades uniformes e desuniformes (remoção das plantas em 1 m de fileira em duas fileiras adjacentes), de 5 a 80 pl m⁻², verificaram que as densidades de plantas remanescentes nas parcelas desuniformes ajustaram a produtividade de grãos em uma ampla gama de populações de plantas, embora não compensasse completamente o decréscimo de densidades de plantas. Em ano em que a precipitação foi pouco acima do normal, a produtividade foi semelhante para densidades de 20 a 80 pl m⁻². Porém no ano com precipitação abaixo do normal ela decresceu na medida que a densidade de plantas foi menor do que 40 pl m⁻² (ANGADI et al., 2003). Em termos de plasticidade, observaram que a menor densidade de plantas resultou em maior número de síliquas por planta, devido ao aumento da ramificação e da retenção de cápsulas por nó, pois formaram-se mais síliquas nos ramos primários e secundários com a redução da densidade de planta, porém o peso de grãos e o número de grãos por síliqua não foram alterados pelas diferentes densidades.

Considerando que o excesso hídrico, como também o espaçamento entre linhas de semeadura, podem afetar as respostas plásticas da canola, é importante também conhecer como o efeito do estresse hídrico se expressa nas plantas de canola sob diferentes espaçamentos em solos naturalmente mal drenados, nas condições de cultivo outono-invernal de clima subtropical úmido.

3 CAPÍTULO I - INTERCEPTAÇÃO E USO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA EM CANOLA SOB MANEJOS DE ESPAÇAMENTO E DRENAGEM SUPERFICIAL DO SOLO

INTERCEPTION AND USE OF PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION IN CANOLA GROWN UNDER DIFFERENT SPACINGS AND SOIL SURFACE DRAINAGE

RESUMO

A produção potencial de biomassa vegetal e de grãos está diretamente relacionada com a capacidade de interceptação da radiação solar pelo dossel vegetal. Neste estudo objetivou-se avaliar a interferência da variação de espaçamento entre fileiras do dossel de canola em solos de terras baixas na capacidade de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) sob com e sem drenagem superficial do excesso de água do solo. Foram realizados dois experimentos em Argissolo Bruno-Acinentado Alítico úmbrico, utilizando-se a cultivar Diamond submetida na variação do espaçamento entre fileiras (0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m) e sob a condição de presença e ausência do sistema de drenagem superficial do solo, nas estações de cultivo de 2018 e 2019, em clima Cfa. As variáveis avaliadas foram caracteres fenológicos, fenométricos e interceptação da RFA no dossel. Para a mensuração da RFA incidente e transmitida no dossel de plantas foram utilizados sensores contendo cinco fotocélulas de silício amorfo com leituras a cada 30 segundos a partir do estádio de roseta das plantas. O excesso hídrico do solo reduziu o crescimento vegetal, com o uso de drenagem, reduziu-se a necessidade térmica para emissão do índice de área foliar máximo bem como do ciclo total da cultura. O coeficiente de extinção da RFA diminuiu com o aumento do espaçamento entre linhas. A eficiência do uso da RFA (EUR) variou entre 1,49 e 3,08 g MJ⁻¹, respectivamente para o espaçamento 0,34 m em 2019 e 0,68 m em 2018. Espaçamento 0,68 m apresentou a EUR maior nas diferentes condições de cultivo, com eficiência mínima superior de 27,6% em relação ao menor espaçamento. O uso de drenos no cultivo de canola aumentou a EUR em 9,7% e 24,3% em relação a ausência de drenagem superficial do solo em 2018 e 2019, respectivamente.

Palavras-chave: *Brassica napus* L. Excesso Hídrico. Arranjo de plantas. Fotossíntese. Matéria seca.

ABSTRACT

The potential production of plant and grain biomass is directly related to the interception of solar radiation by the plant canopy. From this perspective, this study aimed to evaluate the interference of spacing variation among the canopy rows of canola plants grown in lowland soils with and without drainage on the interception of photosynthetically active radiation (PAR). Two experiments were conducted in an Umbric Alithic Dark-Grey Ultisol using the canola cultivar Diamond subjected to different row spacings (0.17, 0.34, 0.51, and 0.68 m) and the presence and absence of soil surface drainage in the 2018 and 2019 crop years, in a Cfa climate. The

variables analyzed were the phenological and phenometric parameters and PAR interception on the canopy. The incident and transmitted PAR on the plant canopy were measured using handmade sensors containing five amorphous silicon solar cells, with readings every 30 seconds beginning at the rosette stage. Soil waterlogging reduced plant growth, and drainage reduced the heat demand for maximum leaf area index emission and the total crop cycle. The extinction coefficient of PAR decreased with the increase in row spacing. The use efficiency of PAR (EUR) ranged from 1.49 and 3.08 g MJ⁻¹ for the row spacing of 0.34 m in 2019 and for 0.68 m in 2018, respectively. The spacing of 0.68 m showed the highest EUR in the different cultivation conditions, with the highest minimum efficiency of 27.6% in relation to the smallest spacing. The use of drains in canola cultivation increased the EUR by 9.7% and 24.3% in relation to the absence of surface drainage in 2018 and 2019.

Keywords: *Brassica napus* L. Waterlogging. Plant arrangement. Photosynthesis. Dry matter.

3.1 INTRODUÇÃO

A canola (*Brassica napus* L.) é uma cultura em expansão no agronegócio mundial de proteínas e energias renováveis. Mundialmente, é a terceira oleaginosa mais cultivada representa apenas 12% da produção total de grãos, totalizando 70,5 milhões de toneladas produzidas em 2019 (FAO, 2021). Seu cultivo ocorre no período de inverno, onde existem poucas opções de culturas viáveis e rentáveis, sendo, portanto, uma opção relativamente segura com retorno ao produtor (GARCIA et al., 2021).

Os solos de terras baixas são áreas potenciais com possibilidade de expansão do cultivo de canola, principalmente no Sul do Brasil para cultivo de inverno (FONTOURA JÚNIOR et al., 2020; ZOU et al., 2014). Após o cultivo de verão com a cultura do arroz e mais recentemente soja, estes solos permanecem em pousio. Assim, a inserção da cultura da canola no sistema produtivo é também uma alternativa interessante para quebra de ciclo de pragas (BRANDLER, 2019; CONCENÇO et al., 2020), otimização da infraestrutura maquinária e diversificação de renda (CONCENÇO et al., 2020; ROCHA, 2018; TARTAGLIA, 2016; TOMM et al., 2009). Porém, a baixa drenagem natural, associada ao aumento de chuvas por períodos mais prolongados nestes períodos de final de outono e inverno (BORTOLUZZI, 2015; SARTORI et al., 2016) tornam necessário a utilização de tecnologias como a drenagem superficial do solo nestes ambientes (BETEMPS,

2021; GOULART, 2016; GOULART; REICHERT; RODRIGUES, 2020; ROCHA, 2018).

O avanço da canola para novas áreas de cultivo está atrelado à sua capacidade produtiva nestas condições ambientais (DALMAGO et al., 2018; LIU et al., 2020). Neste sentido, a otimização de uso dos recursos naturais é imprescindível para o sucesso da cultura, pois afeta diretamente seus processos fisiológicos, bioquímicos, fotoenergéticos e de fotoestímulo (BERGAMASCHI; BERGONCI, 2017; PILAU; ANGELOCCI, 2015). Em ambientes sem limitação de recursos naturais como água e nutrientes, a radiação solar é o principal fator responsável pelos processos de crescimento e desenvolvimento das plantas, expansão foliar, enchimento de grãos e acúmulo de biomassa (CASAROLI et al., 2007; EDWARDS; HERTEL, 2011; MONTEITH, 1994).

O uso efetivo da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) pelo dossel vegetal não está associado somente à sua disponibilidade, mas também à capacidade em interceptá-la (FAGAN et al., 2013; FOCHESSATTO et al., 2016; KRÜGER et al., 2011a; KRÜGER et al., 2017). Em dosséis de plantas, a mensuração de parâmetros como a eficiência de interceptação da RFA, o coeficiente de extinção e a eficiência de uso da RFA estão diretamente relacionados com o aproveitamento da RFA pelas plantas (DALMAGO et al., 2018; KRÜGER et al., 2017; LAKE; SADRAS, 2017), sendo o índice de área foliar (IAF) um dos componentes de maior impacto (BERGAMASCHI; BERGONCI, 2017; KRÜGER et al., 2017; PILAU; ANGELOCCI, 2015). Porém, os ramos e as estruturas reprodutivas também apresentam influência da estrutura do dossel de plantas de canola, principalmente na interceptação de RFA no período reprodutivo da cultura (FRAY et al., 2009; NIED, 2013; FOCHESSATTO et al., 2016). Neste sentido, o ajuste do arranjo espacial de plantas é uma alternativa para melhorar a interação entre o dossel e os recursos naturais, especialmente à radiação solar (KRÜGER et al., 2011a; KUNZ et al., 2007; PERUZATTO et al., 2017). A modificação da competição intraespecífica, obtida pela alteração do espaçamento entre linhas e/ou plantas na linha, além de induzir alterações morfológicas, associadas ao fechamento do dossel, também podem influenciar o acúmulo de biomassa, os componentes e o rendimento de grãos (BERGAMASCHI; BERGONCI, 2017; FONTOURA JUNIOR et al., 2020; KRÜGER et al., 2011b; MODOLO et al., 2016).

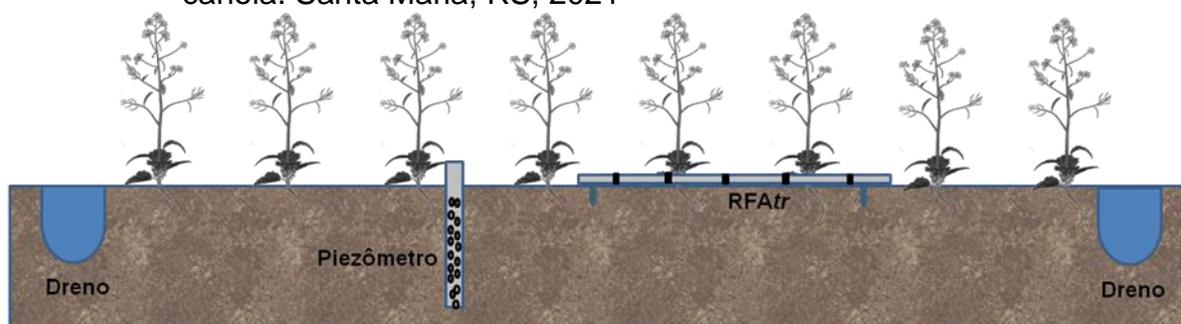
Ainda são restritos na literatura resultados sobre o efeito da modificação do arranjo espacial e sua interação com a RFA em ambientes com condições adversas (ZHU, 2016), não contemplando condições locais específicas da depressão central do Rio Grande do Sul, embora sendo basicamente desenvolvidos em condições ótimas de drenagem do solo, como solos de coxilha (KRÜGER et al., 2011a; KRÜGER et al., 2017; KUAI et al., 2015; RONDANINI et al., 2017). Assim, incertezas relacionadas ao melhor espaçamento em solos de terras baixas precisam ser mais elucidadas para consolidar estes ambientes como alternativas promissoras para o cultivo com canola (FONTOURA JUNIOR et al., 2019). Dessa maneira, este trabalho teve como objetivo avaliar a fenologia, modelar o índice de área foliar e determinar as eficiências de interceptação e uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo dossel de canola sob variação de espaçamentos entre linhas em solos com e sem drenagem do excesso hídrico.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Dois experimentos foram conduzidos, um em cada safra de 2018 e 2019, na área experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, localizada na Depressão Central do Rio Grande do Sul (29° 43' 23" S; 53° 43' 15" O; 95 m). O clima da região é do tipo Cfa, subtropical úmido com temperatura média normal do mês mais frio em junho com 12,9°C (HELDWEIN; BURIOL; STRECK, 2009). As chuvas são distribuídas regularmente em todos os meses do ano, com média anual de 1712,4 mm de 92 anos (BURIOL et al., 2006) e com alta probabilidade de ocorrência de grande e frequente excedente hídrico nos meses de maio a setembro (BURIOL et al., 1980).

O solo do ambiente de cultivo é classificado como Argissolo Bruno-Acinzentado Alítico úmbrico (SANTOS et al., 2018), com perfil gleissólico e presença de elevação do lençol freático próximo à superfície em períodos chuvosos, atingindo períodos de saturação hídrica superficial do solo frequentemente. O monitoramento do lençol freático foi realizado através da perfuração de poços de observação (piezômetros) dispostos até uma profundidade de 0,30 m ao centro de cada unidade experimental (Figura 1).

Figura 1 – Esquema estrutural das unidades experimentais com a respectiva instalação do piezômetro e barras de RFA abaixo do dossel vegetal de canola. Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

Os tratamentos consistiram um arranjo fatorial 2x4, com fator A sendo a drenagem superficial do solo (com e sem), e o fator D os espaçamentos entre fileiras de sementeira (0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m), dispostos no delineamento experimental em blocos casualizados com quatro repetições. As dimensões das unidades experimentais foram de 10,0 x 8,5 m, sendo a área útil de 6 m de comprimento no sentido das linhas de sementeira e 6 m de largura. O número de linhas por parcela variou conforme seu espaçamento entre linhas, respeitando-se após o desbaste, um estande de 40 plantas m^{-2} . Para a realização da drenagem superficial do solo por sulcos foi utilizado um implemento agrícola denominado valetadeira rotativa. Os sulcos foram abertos com profundidade de 0,25 m no contorno das parcelas que receberam este fator. Estes drenos foram construídos anteriormente ao preparo final do solo por ocasião da sementeira, auxiliando na demarcação das unidades experimentais.

O preparo do solo consistiu na realização de duas gradagens em pré-sementeira, uma para o processo de incorporação do calcário, e a segunda visando a uniformização de destorroamento do solo. Para a correção da acidez do solo foi empregado calcário dolomítico (PRNT 67%) e calcário dolomítico Filer (PRNT 100%) um mês antes da instalação do experimento em aplicação superficial. O preparo final do solo com vistas a um melhor processo de sementeira, utilizou-se uma enxada rotativa acoplada em micro trator, para incorporação da adubação mineral de base e nivelamento final da rugosidade do terreno. A adubação mineral foi realizada conforme a recomendação para canola no Rio Grande do Sul (TOMM, 2007),

baseada na análise de solo coletada em período anterior a instalação do experimento (Apêndice A). Utilizou-se a formulação comercial 5-20-20 para adubação mineral de base na semeadura, e para adubação nitrogenada de cobertura foram utilizados ureia (45% de N) e sulfato de amônio (21% de N e 22% de S). Ambos os fertilizantes foram baseados numa expectativa de rendimento para a cultura da canola de 3,0 Mg ha⁻¹. A adubação nitrogenada de cobertura foi fornecida às plantas 50% em estágio vegetativo com quatro folhas verdadeiras e o restante no início do florescimento da cultura.

A cultivar de canola semeada foi a Diamond, nas datas de 29 de maio de 2018 e em 06 de junho de 2019, observando-se as condições meteorológicas favoráveis para realização do preparo do solo e condições de umidade do solo para os processos de semeadura e germinação. Para formação do estande final almejado de plantas de 40 plantas m⁻² utilizou-se o dobro em quantidade de sementes aptas. Após a emergência das plântulas, iniciaram-se os trabalhos de acompanhamento da cultura, como o desbaste após a emissão da primeira folha verdadeira (estádio V1), tratos culturais, adubação de cobertura e controles fitossanitários, que seguiram recomendações para a cultura (TOMM, 2007).

As variáveis meteorológicas da temperatura do ar (Tar, °C), precipitação pluvial (P, mm dia⁻¹), radiação solar global incidente (Rg, MJ m⁻² h⁻¹), foram obtidas na estação automática pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia do INMET, localizada na UFSM dentro de um raio de 200 m do local do experimento.

A avaliação fenológica consistiu no acompanhamento do desenvolvimento da cultura, avaliando a mudança de estágio fenológico três vezes por semana. Neste sentido, foram demarcadas plantas em um metro linear no centro da parcela, nas quais se observou os principais estádios fenológicos conforme escala de Iriarte e Valetti (2008), observando-se a condição de 50% das plantas se encontrarem com respectivas características (Anexo A). Com essas informações definiram-se os principais subperíodos (S-EM; EM-FR; FR-IF; IF-G3; G3-FF; FF-G5) sendo S a semeadura, EM a emergência de plântulas, FR o final do período de roseta; IF o início do florescimento; G3 síliquis com mais de 4 cm; FF o final do florescimento; G5 com 90% das síliquis com grãos com coloração escura (Maturação) e se determinou o ciclo total da cultivar (S-G5).

Na estimativa da área foliar (AF), foram realizadas coletas a partir da emissão da quinta folha verdadeira, ou seja, entrada no estágio de roseta. Para a sua

determinação foram coletadas 5 plantas aleatórias em cada parcela, em intervalos de 5 dias para períodos iniciais e posteriormente ao florescimento pleno, foi prolongado este intervalo para 10 dias. As amostras coletadas foram fracionadas em folhas, caules, flores e síliquas, quando presentes. Posteriormente, as folhas foram dispostas sobre uma estrutura horizontal bem iluminada para a realização de fotografias digitais. As imagens amostradas foram analisadas no programa Quant.v.1.0.2 (VALE et al., 2001) para quantificar a AF.

De posse destas informações, foi determinado o índice de área foliar (IAF), seguindo as definições propostas por Watson (1947), representando a área foliar do dossel por unidade de superfície do solo, ou seja:

$$IAF = \frac{AF}{ASE} \quad (1)$$

sendo AF a área foliar média por planta, em cm², e ASE a área ocupada pela planta no ambiente de coleta, em cm².

Posteriormente, as folhas e o restante das frações previamente separadas foram acondicionados em sacos de papel e levados a estufa com circulação forçada de ar a 60°C para secagem até massa constante. Após a secagem, foi medida a matéria seca em balança de precisão, com resolução de 0,001 g, para a determinação da partição da matéria seca e estimativa da matéria seca da parte aérea (MSPA).

Para a modelagem do índice de área foliar (IAF) foi efetuado para cada ano de cultivo uma análise de variância, considerando como experimento trifatorial em delineamento blocos casualizados em parcelas subdivididas no tempo com quatro repetições. Conforme resultados da análise de variância foi realizado o ajuste de modelos não lineares para os diferentes espaçamentos dentro de cada sistema de drenagem do solo, conforme a seguinte equação:

$$IAF = a * e^{-0,5 \left[\frac{\ln\left(\frac{GD}{b}\right)}{c} \right]^2} \quad (2)$$

sendo *a* o IAF máximo, *b* a necessidade térmica para atingir o IAF máximo, *c* a longevidade do respectivo IAF e GD a soma térmica acumulada.

Para a determinação da necessidade térmica em graus dia (GD) foi utilizado o método da soma térmica descrito por Rosa et al. (2009), utilizando-se as três temperaturas cardinais para a cultura da canola, em que foi considerada a temperatura basal inferior como 5°C (LUZ et al., 2012), temperatura ótima da cultura como 21°C (MORRISON, 1993) e basal superior do ar como 27°C (BATTISTI et al., 2013) dentre quais a cultura apresenta seu desenvolvimento, conforme as seguintes equações:

Se $T_b < T_{med} \leq T_{ot}$:

$$ST_d = (T_{med} - T_b) * 1 \text{ dia} \quad (3)$$

Se $T_{ot} < T_{med} \leq T_B$:

$$ST_d = \left\{ (T_{ot} - T_b) * \left[\frac{T_B - T_{med}}{T_B - T_{ot}} \right] \right\} * 1 \text{ dia} \quad (4)$$

Se $T_{med} < T_b$:

$$ST_d = 0 \quad (5)$$

Se $T_{med} > T_B$:

$$ST_d = T_B \quad (6)$$

sendo:

STd a soma térmica diária (°C dia);

Tmed a temperatura média diária do ar (°C);

Tb a temperatura base inferior para a cultura de 5°C;

TB a temperatura base superior para a cultura de 27°C; e,

Tot a temperatura ótima para a cultura de 21°C.

A soma térmica acumulada (GD, °C dia) foi calculada por:

$$ST_a = \sum_1^n ST_d \quad (7)$$

sendo “n” a duração em dias do período avaliado.

Para a mensuração da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foram utilizados conjuntos de barras, cada uma contendo cinco fotocélulas de silício amorfo, ligados em paralelo (PANDOLFO, 1995) e espaçadas em 0,15 m entre si. Estes conjuntos de fotocélulas foram conectados a dataloggers CR1000 e Multiplexadores AM16/32 da marca Campbell Scientific®, com intervalos de leitura e

armazenamento a cada 30 segundos. A orientação das barras (Leste-Oeste) ocorreu transversalmente às linhas de semeadura (norte-sul), a uma altura de 0,05 m do nível do solo abaixo do dossel para a mensuração da RFA transmitida (RFA_{tr}) (Figura 1).

Na determinação da RFA incidente (RFA_{inc}) foram alocadas 4 repetições de barras ao lado do experimento numa altura de 0,8 m. As barras utilizadas na avaliação foram calibradas anteriormente à instalação do experimento com auxílio de dois sensores padrão com coeficientes conhecidos (Quantum, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para a conversão da leitura de mV obtidas nos eletrodos de saída das barras artesanais.

Após ajuste com o coeficiente de calibração, os dados dos sensores de RFA foram convertidos de $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para $\text{MJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$, segundo a metodologia proposta por Thimijan e Heins (1983) e adaptado por Nied (2013):

$$RFA = \sum_1^n \left[\frac{RFA_m * T}{4,596 * 1000000} \right] \quad (8)$$

sendo, 1000000 o fator de conversão de J para MJ, 4,596 o fator para a conversão de μmol para J, e t o tempo entre duas leituras amostrais seguidas, sendo a unidade (s, h, dia) dependente do intervalo considerado (RFA_m).

Após a transformação das unidades procedeu-se o cálculo da RFA interceptada (RFA_i) no dossel e sua eficiência de interceptação da RFA (ϵ_i) conforme Pandolfo (1995):

$$RFA_i = RFA_{inc} - RFA_{tr} \quad (9)$$

$$\epsilon_i = \frac{RFA_i}{RFA_{inc}} \quad (10)$$

sendo RFA_{tr} a RFA transmitida pelo dossel e RFA_{inc} a RFA incidente sobre o dossel das plantas.

O coeficiente de extinção (k) da RFA pelo dossel foi estimado através da lei de Beer adaptada por Monsi e Saeki (1953), onde se interpolou a eficiência de interceptação da RFA com o índice de área foliar observado em cada coleta. Assim, através do ajuste do coeficiente angular “ b ” na linearização da equação, determinou-se seu valor:

$$\ln(1 - \varepsilon_i) = -k * IAF \quad (11)$$

sendo k o coeficiente de extinção e IAF o índice de área foliar.

Através do coeficiente de extinção foi possível estimar a eficiência de interceptação da RFA (ε_i) para os dias sem medida de RFA_i . O IAF também foi estimado para estes dias através de modelos não lineares, em função da soma térmica acumulada. Para os dados de RFA_{inc} não mensurados a campo e/ou correção de falhas, utilizou-se o coeficiente angular ajustado para relação entre RFA_i e radiação solar global (R_g) obtida na estação automática, para cada ano de cultivo (2018: 0,3945 e 2019: 0,4563) conforme Apêndice G.

A eficiência do uso da RFA (RUE), expressa em $g MJ^{-1}$, foi estimada através da análise de regressão entre a MSPA acumulada pela planta ($g m^{-2}$) e o somatório de RFA interceptada pelo dossel em cada data de observação, de acordo com:

$$MSPA = a \sum_1^n RFA_i + b \quad (12)$$

sendo “ a ” a RUE e $\sum RFA_i$ o somatório de RFA_i ($MJ m^{-2}$).

Todas as variáveis foram submetidas ao teste das pressuposições do modelo matemático e posteriormente à análise da variância dos dados pelo teste F. Quando significativos, as médias dos fatores qualitativos foram submetidas o teste de Scott-Knott (5% de probabilidade) e para as médias dos fatores quantitativos, submetidas à análise de regressão através de modelos de ajuste cujo significado biofísico fosse coerente. Para as análises, foram utilizados os softwares SISVAR (FERREIRA, 2014), Microsoft Excell® 2007 e SigmaPlot 11.0.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Condições meteorológicas

A precipitação pluviométrica acumulada durante o período de crescimento e desenvolvimento da cultura da canola (maio-outubro) foram de 643 mm e 591 mm para o primeiro e segundo ano de cultivo, respectivamente (Figura 2). Os acumulados de chuva são pouco inferiores aos 825 mm observados na média climatológica para o período 1981-2010 para a região central do Rio Grande do Sul

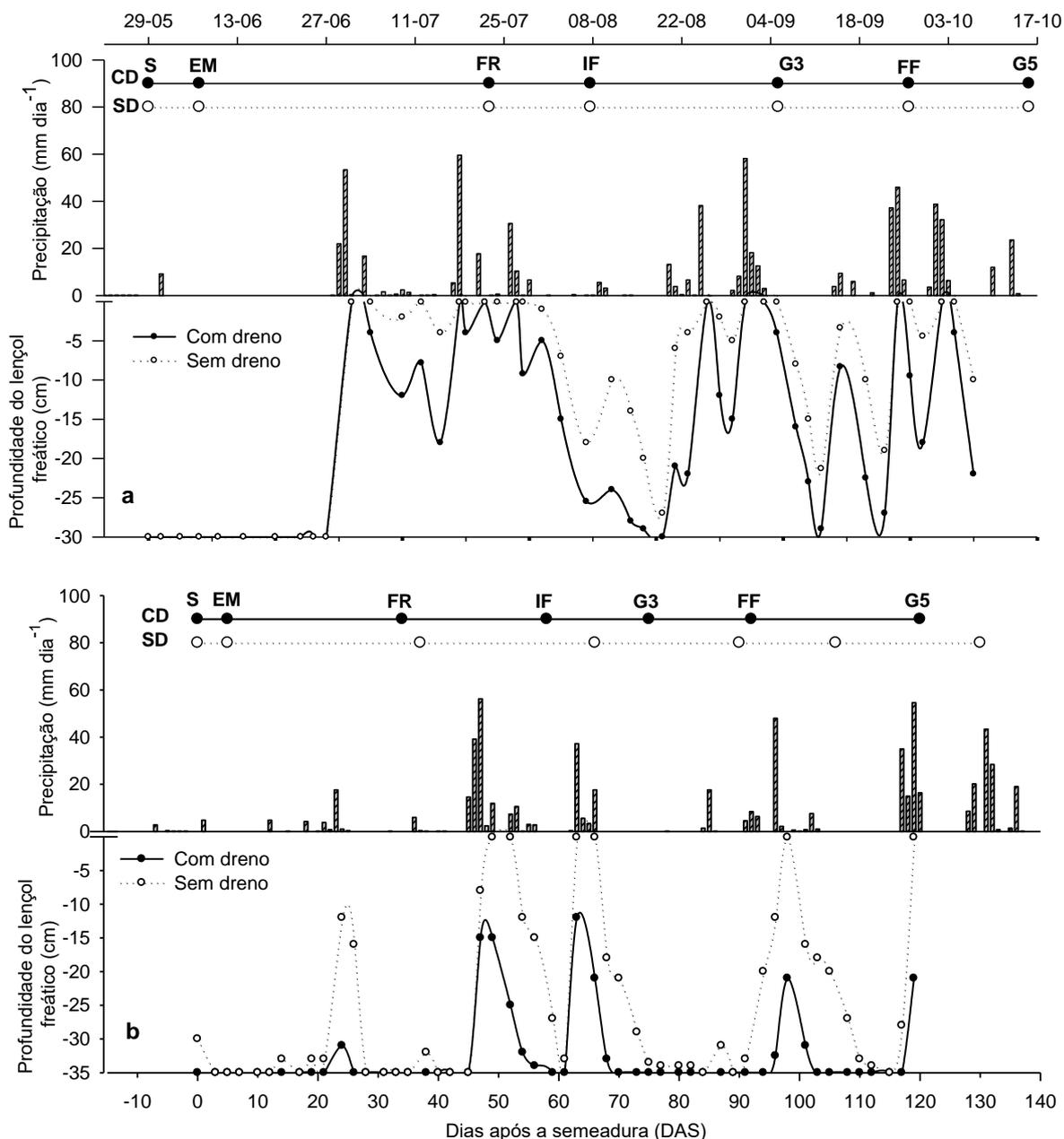
(INMET, 2021). Porém, os valores de precipitação foram superiores aos respectivos 312 a 500 mm necessários, conforme Tomm et al. (2009) e Tesfamariam et al. (2010), para a cultura da canola suprir sua demanda hídrica durante no ciclo produtivo e garantir seu potencial produtivo. Neste sentido, a disponibilidade de precipitação pluvial ocorrida nos dois anos foi suficiente para atender a demanda hídrica da cultura, porém o excesso de chuvas, como observado (Figura 2) passou a se tornar um limitante ao desenvolvimento da cultura, principalmente para o ambiente de cultivo empregado no estudo, em especial na condição sem drenos.

O cultivo de canola em solos com problemas de drenagem superficial, associados com a elevação do lençol freático em eventos com grandes acumulados de chuva, concentrados em poucos dias, são um entrave para o sucesso da cultura nestes ambientes, principalmente na metade sul do Rio Grande do Sul. Portanto, 312 a 500 mm de chuva podem não ser suficientes ou até excessivos em algum período no ciclo da canola. Neste sentido, pode ser observado que durante ambos os anos de cultivo, ocorreu elevação do lençol freático em consequência aos eventos mais concentrados e de longa duração da precipitação pluvial. Em 2018, o excesso hídrico foi observado em maior intensidade e persistência na fase vegetativa da cultura, principalmente no final do subperíodo de roseta e de alongação da haste das plantas. Neste subperíodo, a camada aerada do solo permaneceu restrita a no máximo 0,05 m por um período superior a 30 dias em SD (Figura 2a). Além da baixa drenagem subsuperficial do solo, o período coincidiu com a redução da disponibilidade de radiação solar (Figura 3), o que resultou em uma limitação para os processos evaporativo, transpiratório e fotossintético.

Em 2019 a elevação do lençol freático à superfície do solo também esteve associada a grandes eventos pluviométricos com persistência em períodos maiores que dois a três dias, condicionando a saturação da camada superior do solo (Figura 2b). Assim, para este ciclo de cultivo com canola foram observados quatro eventos de maior significância, iniciados em 47 dias após a semeadura (DAS) (23/jul), 64 DAS (9/ago), 97 DAS (11/set) e 119 DAS (3/out) (Figura 2b). Ambientes com déficit de drenagem superficial podem tornar-se limitantes ao cultivo de canola quando submetidos à grande intensidade de chuvas de longa duração (TARTAGLIA, 2016). Com a elevação do lençol freático, ocorre a redução da concentração de oxigênio no solo, impondo uma zona anaeróbica para o crescimento radicular. Esta restrição

condiciona a planta uma redução no aporte de nutrientes e água para atender à necessidade em seu crescimento (ZOU *et al.*, 2014).

Figura 2 – Precipitação pluviométrica e profundidade do lençol freático na ausência e presença de drenos em Argissolo Bruno-Acinzentado Alítico úmbrico durante o ciclo de cultivo da canola em dias após a semeadura (DAS) anos de 2018 (a) e 2019 (b). Santa Maria, RS, 2021



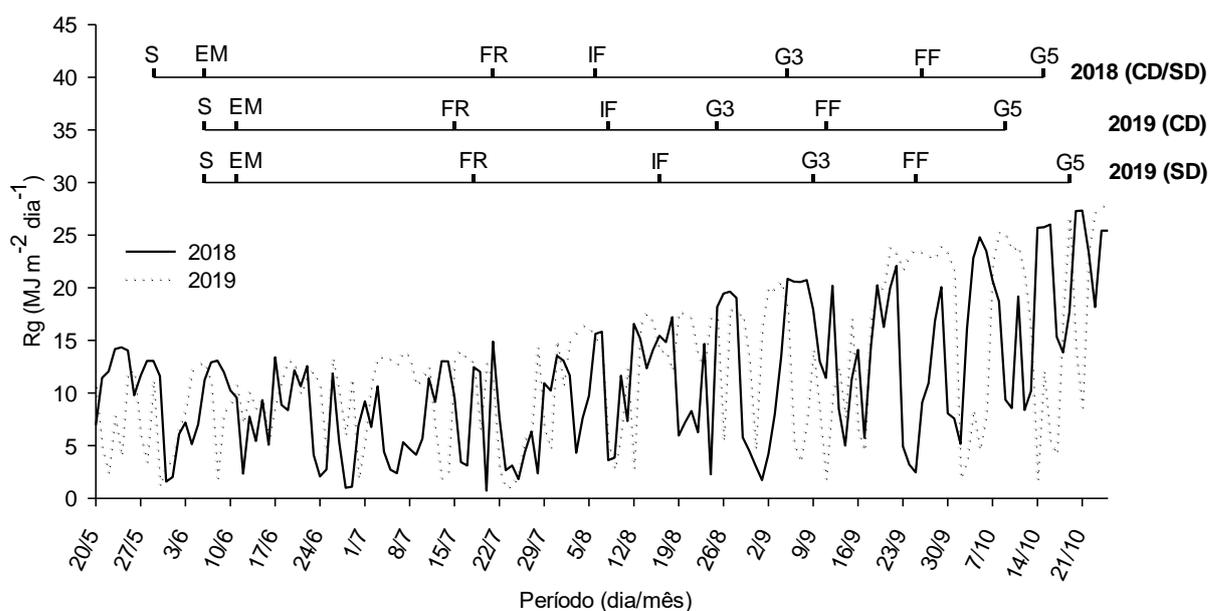
Fonte: Autor.

Estudos realizados na China (XU *et al.*, 2015; ZHOU; LIN, 1995; ZOU *et al.*, 2014) concluíram que há grande suscetibilidade da planta de canola ao encharcamento do solo, sendo três dias suficientes para observação de perdas

produtivas. Em Santa Maria, RS, Tartaglia (2016) constatou que em apenas 24 horas sob condição de excesso hídrico foram suficientes para ocorrer redução na velocidade de emergência e estabelecimento das plantas, resultando em menor massa seca final da parte aérea, número de siliquas e rendimento de grãos.

A radiação solar global incidente (R_g) durante o ciclo de cultivo apresentou a sua menor disponibilidade no solstício de inverno, coincidindo com o início da fase vegetativa da cultura da canola nos dois anos de cultivo (Figura 3). Na segunda quinzena de junho, foram observadas médias diárias de R_g em 7,63 e 8,82 MJ m^{-2} , respectivamente em 2018 e 2019.

Figura 3 – Disponibilidade de radiação solar global diária (R_g) observada durante o cultivo de canola em 2018 e 2019 em Santa Maria, Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2021



Com o crescimento das plantas, a disponibilidade de R_g aumentou gradativamente para a cultura até o final do ciclo. Porém, na segunda quinzena de setembro, a qual coincidiu com o final do florescimento e enchimento de grãos, observou-se uma maior disponibilidade de R_g no ano de 2019, sendo 54,3% superior a 2018 (Apêndice I). No ciclo de cultivo, a disponibilidade de R_g em 2019, foi superior desde a primeira quinzena de junho até a segunda quinzena de agosto, além da segunda quinzena de setembro. Neste sentido, a disponibilidade média

quinzenal durante o ciclo de cultivo compreendido para este experimento de 01/06 a 15/10, foi de 10,71 e 12,30 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente 2018 e 2019 (Apêndice I).

A maior disponibilidade de radiação é fundamental para manutenção da capacidade produtiva da cultura. Na fase vegetativa, onde as folhas interceptam grande parte da RFA, a maior disponibilidade pode condicionar um maior acúmulo de fotoassimilados na planta, permitindo assim, melhor crescimento e expressão dos caracteres reprodutivos. No período reprodutivo da cultura, as estruturas reprodutivas passam a representar uma quantidade significativa da interceptação da RFA, limitando a sua transmitância até as folhas, que correspondem aos órgãos mais especializados na produção de fotoassimilados. Porém, apesar da menor capacidade fotossintética, o acúmulo de reservas neste período é fundamental para o enchimento de grãos (FOCHESATTO et al., 2016).

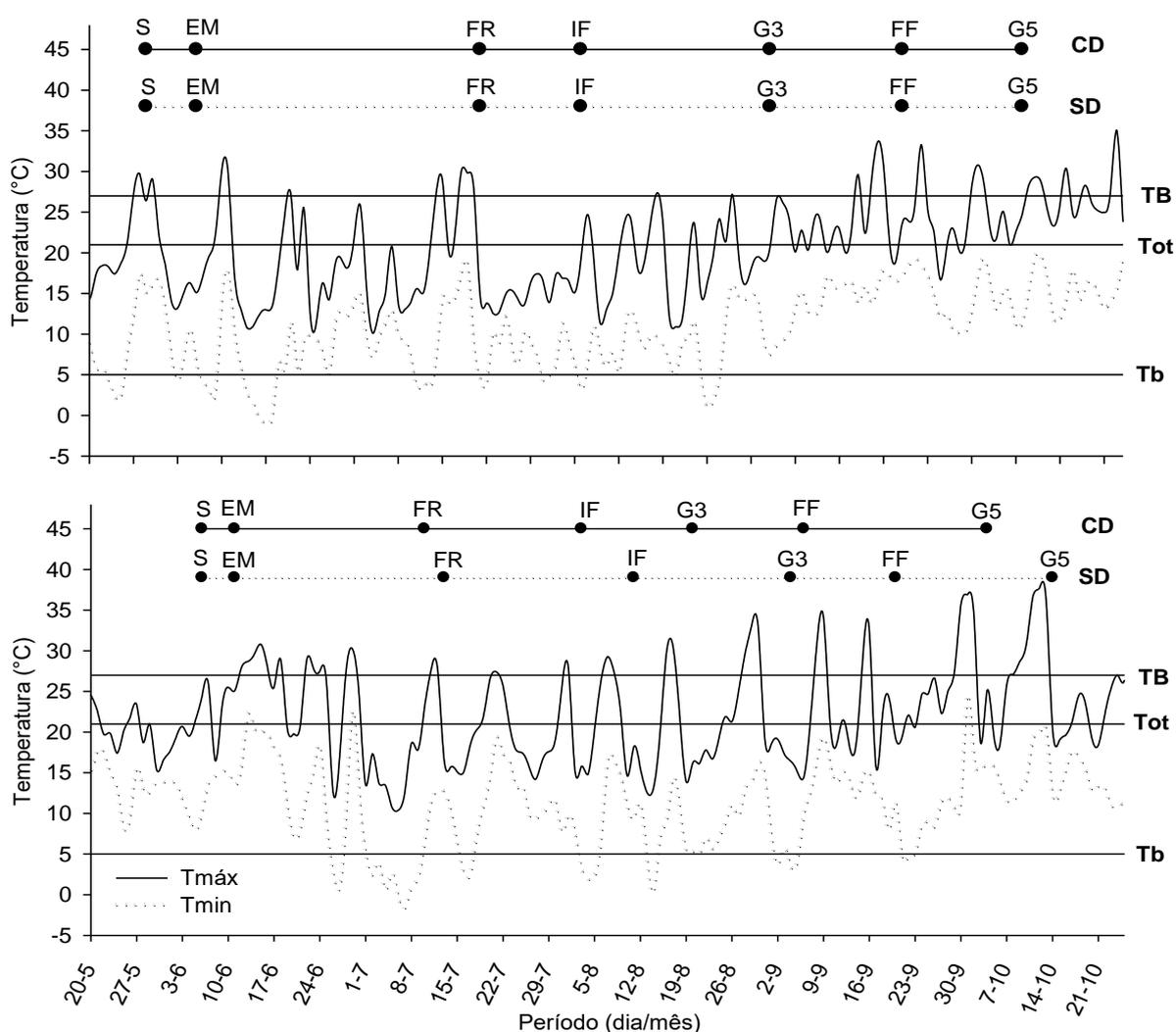
As condições térmicas são atreladas principalmente a disponibilidade de Rg e ao balanço de energia. Neste sentido, na comparação dos dois ciclos de cultivo observou-se condições distintas para a temperatura do ar. Em 2018 ocorreu uma variação da temperatura média diária do ar entre 5,1°C e 26,4°C, respectivamente, mínima (T_{mín}) e máxima (T_{máx}) absolutas -0,9°C e 33,5°C (Figura 4a). Em 2019, a T_{máx} absoluta foi de 37,7°C, T_{mín} absoluta de -1,6°C, e a temperatura média diária variou entre 4,5°C e 31,9°C (Figura 4b).

No período entre a emergência e o final de roseta observou-se temperaturas médias de 13,3 e 15,3°C, respectivamente, para 2018 e 2019. Já para o período do final de roseta até início do florescimento da cultura, a temperatura média apresentou uma redução, sendo constatados 11,2 e 14,6°C, com amplitude térmica média de 7,6 e 9,2°C no primeiro e segundo anos de cultivo, respectivamente. Neste sentido, no primeiro ano de cultivo, a temperatura do ar teve uma melhor condição ao desenvolvimento da cultura. Conforme Thomas (2003), a canola é favorecida no seu crescimento na fase vegetativa com temperaturas entre 13,0 e 22,0°C, com temperatura média em torno de 17,0°C.

No período reprodutivo, as altas temperaturas do ar caracterizaram maior ocorrência em ambos os ciclos produtivos em relação à ocorrência de temperaturas baixas e/ou geadas. Na safra 2019 (Figura 4b), observaram-se T_{máx} acima da temperatura basal superior (TB) com maior frequência em relação a 2018 (Figura 4a). Em 2019, as altas temperaturas coincidiram com o subperíodo inicial do florescimento, com 8 dias com T_{máx} ultrapassando a TB, onde valor absoluto de

34,1°C no 22º dia foi constatado. As altas temperaturas no início do florescimento afetam mais a capacidade produtiva do que na fase de desenvolvimento das síliquas e enchimento de grãos (ANGADI et al., 2000). Conforme Robertson et al. (2013), a exposição do cultivo de canola durante o período de florescimento com temperaturas acima da TB (29°C) condiciona uma redução na produtividade de grãos de canola em 0,08% para cada hora de exposição.

Figura 4 – Temperatura máxima do ar (—, Tmax) e temperatura mínima do ar (..., Tmin) diárias medidas na estação automática do INMET durante os ciclos de cultivo da canola nas safras 2018 (a) e 2019 (b) em Santa Maria, RS e sua relação com as temperaturas cardinais de crescimento (TB: temperatura basal superior, Tot: temperatura ótima, Tb: temperatura basal inferior, CD: sistema de cultivo com drenagem superficial do solo, SD: sem a presença de drenos). Escala fenológica da canola (IRIATE; VALETTI, 2008). Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

3.3.2 Fenologia da cultura

A duração dos diferentes subperíodos em dias após a semeadura (DAS) e em soma térmica acumulada (STa, GD) no desenvolvimento da cultura da canola sofreram influência apenas do fator sistema de drenagem superficial do solo em 2019 (Tabela 1). Em 2018, as condições hídricas adversas podem ter nivelado as respostas de desenvolvimento fenológico de canola mesmo sob distintas condições de espaçamento e drenagem superficial do solo (Figura 2 e 3).

Tabela 1 – Necessidades térmicas em distintos subperíodos para a cultivar de canola Diamond em 2018 e 2019 em dois sistemas de cultivo: CD (com drenagem superficial do solo) e SD (sem a presença de drenos). Santa Maria, RS, 2021

SUBPERÍODO	Número de dias			Soma térmica acumulada		
	2018	- - - 2019 - - -		2018	- - - 2019 - - -	
	CD/SD ^{ns}	CD*	SD*	CD/SD ^{ns}	CD*	SD*
S-EM	8,0	5,0a	5,0a	68,2	65,1a	65,1a
EM-FR	45,7	29,4a	32,2b	323,1	306,6a	320,4b
FR-IF	15,9	23,8a	28,9b	103,3	213,6a	261,7b
EM-IF	61,6	53,1a	61,1b	426,4	520,2a	582,1b
IF-G3	29,6	17,1a	24,1b	256,1	131,1a	200,2b
G3-G5	39,5	44,8b	39,9a	489,7	476,4a	490,6b
IF-FF	50,2	33,9a	40,1b	520,2	278,8a	361,9b
IF-G5	69,1	61,9a	63,9a	745,8	607,4a	690,8 b
FF-G5	18,9	28,0b	23,8a	225,5	328,6a	328,9a
S-G5	138,7	120,0a	130,0b	1240,3	1192,8a	1338,0b
EM-G5	130,7	115,0a	125,0b	1172,1	1127,7a	1272,9b

Fases de desenvolvimento conforme escala de CETIOM (2011), S: semeadura; EM: emergência; FR: final do período de roseta; IF: início do florescimento; G3: síliquas com mais de 4 cm; FF: final do florescimento; G5: 90% das síliquas com grãos com coloração escura (Colheita). ^{ns} não significativo.

*Letras distintas na linha diferem estatisticamente 5 % de probabilidade de erro pelo teste de Scott-Knott para a utilização do sistema de drenagem superficial do solo.

Fonte: Autor.

Na safra 2018, o subperíodo semeadura-emergência (S-EM) foi mais prolongado em relação ao ano de 2019. A condição de umidade do solo pode estar associada ao período para a emergência das plântulas, onde, apenas ocorreu precipitação pluviométrica no quarto dia após a semeadura em 2018, diferente de 2019, em que se observou precipitação no dia subsequente ao processo de semeadura.

Após a emergência até a maturação fisiológica (EM-G5), em 2018 a cultura da canola perdurou por 131 dias, com 58% deste período compreendido na fase vegetativa. Dentre as fases de crescimento, o subperíodo de emergência ao final de roseta (EM-FR) foi o mais extenso, com 45 dias. A maior duração de EM-FR está atrelada a ocorrência em maior frequência de precipitação pluviométrica neste período, ocasionando problemas de drenagem superficial observados através dos piezômetros, mesmo para os tratamentos com sistema de drenos superficiais (Figura 2a).

Em 2019, observou-se uma distinção entre os sistemas com e sem drenagem superficial do solo, com alteração na duração do ciclo de desenvolvimento da cultura, perfazendo 120 e 130 dias, respectivamente (Tabela 1). A fase vegetativa caracterizada pelo subperíodo emergência ao início do florescimento (EM-IF) foi a que apresentou maior duração na ausência de drenos superficiais, alongando o subperíodo de crescimento da cultura em torno de 15%. A elevação do lençol freático à superfície observada dos 49 aos 52 DAS pode estar relacionada ao aumento cronológico do subperíodo, pela condicionante de hipoxia e anoxia do sistema radicular, reduzindo a capacidade do crescimento tanto do sistema radicular quanto da parte aérea posteriormente (TAVARES et al., 2018).

Na fase reprodutiva da cultura em 2019, o subperíodo entre o início do florescimento a 90% das siliquis com grãos de coloração escura (IF-G5) não apresentou diferença na duração em dias no fator drenagem. A diferença observada nesta fase relacionou-se ao subperíodo de florescimento e enchimento de grãos. No sistema com drenagem superficial, a cultura da canola teve o subperíodo IF-FF 15,5% menor e em contraposição 15% maior o subperíodo final de florescimento a colheita (FF-G5). Neste sentido, a utilização de drenos favoreceu um período maior para o enchimento de grãos enquanto na ausência dos drenos observou-se um prolongamento do florescimento (IF-FF) da cultura com sucessivas novas emissões de flores.

O excesso hídrico do solo em consequência da elevação do lençol freático, como observado aos 98 DAS através do monitoramento de piezômetros (Figura 2b), foi uma das condicionantes inter-relacionadas com o aumento do subperíodo de florescimento. O estresse condicionado pela hipoxia nas plantas pode ter resultado na abscisão floral e de siliquis (BATTISTI et al., 2013), e por consequência da

plasticidade da cultura, a emissão de novas estruturas vegetativas e reprodutivas para compensar a perda da capacidade produtiva (ROCHA, 2018).

O aumento do subperíodo do IF-FF em SD pode ter relação negativa para a produtividade da canola, pois além do gasto energético para a emissão de novas estruturas vegetativas e reprodutivas, ocorre também uma redução na capacidade de interceptação de RFA pela abscisão foliar e maior sombreamento das estruturas reprodutivas adicionais (KRÜGER et al., 2014; TARTAGLIA, 2016). Neste sentido, correlações negativas entre produtividade e número de ramos terciários (-0,31) e positivas para com número de ramos secundários (0,23), encontrados por Krüger et al. (2011b) corroboram com a inferência de que o gasto de fotoassimilados e metabólitos secundários com maior emissão de ramos afeta negativamente a produtividade de grãos de canola.

Outros fatores como a temperatura do ar (DALMAGO et al., 2010; TOMM et al., 2010) e a disponibilidade de radiação solar (KOVALESKI, 2015; KRÜGER et al., 2011a) também possuem relação com a resposta da cultura da canola na duração de seus subperíodos (DALMAGO et al., 2010). A ocorrência de temperaturas mínimas do ar abaixo da temperatura basal inferior (T_b) em maior intensidade para os tratamentos submetidos à ausência de drenagem superficial em 2019 ocorreu no subperíodo do florescimento pleno. No subperíodo IF-FF constatou-se registros de temperatura abaixo de 5°C em 7 dias versus apenas 5 dias para os tratamentos com drenagem superficial. A presença de baixas temperaturas do ar e mais intensas neste subperíodo podem ter gerado além da paralisação do crescimento vegetal, a inibição de reações metabólicas (CHINNUSAMY et al., 2007), funcionamento do sistema fotossintético (PERBONI et al., 2014; SON; IDE; GOTO, 2020) e o abortamento floral.

O tempo térmico (graus-dia, GD) é a variável que expressa mais precisamente a necessidade das plantas para determinação do seu crescimento e desenvolvimento (DALMAGO et al., 2009; NIED, 2013). Sua estimativa sofre influência direta das condições ambientais, atreladas tanto à temperatura do ar como ao balanço de energia. Neste sentido, observaram-se 1172,1 e 1272,9 GD para o ciclo total da canola em 2018 e em 2019, respectivamente para SD e CD (Tabela 1). Estes valores corroboram com estudos de Nied (2013), que obteve uma variação entre 1239 e 1529 GD para diferentes híbridos de canola, datas de semeadura e anos de cultivo, sendo as mais precoces, tal como o híbrido Diamond no atual

trabalho, as de menor necessidade térmica. Porém, o acúmulo térmico foi inferior aos 1515 a 1644 GD obtidos por Luz (2011) com distintos híbridos. Essas diferenças, além das características de cultivar, podem decorrer de outros fatores. Conforme Dalmago et al. (2010), existe uma grande heterogeneidade na resposta da cultura da canola no seu desenvolvimento às condições de cultivo e ambientais, tais como profundidade de semeadura, geadas, adubação, fitossanidade, disponibilidade de radiação solar, excesso e déficit hídrico.

A utilização do sistema de drenagem superficial do solo no sistema de cultivo com canola em ambiente com elevação do lençol freático apresentou significância apenas em 2019, com uma redução em seu ciclo de desenvolvimento em 11,4%, ou seja, 145,2 GD. Os drenos possuem a função de escoar a água superficial do solo logo após períodos de precipitação, evitando o acúmulo superficial e de limitar a elevação do lençol freático a superfície, condicionando assim de forma mais rápida uma zona aerada para realização das trocas gasosas pelo sistema radicular, reduzindo o estresse por excesso hídrico do solo (TAVARES et al., 2018).

A utilização de drenagem superficial do solo, além de interferir no ciclo total de desenvolvimento da cultura, também apresentou redução do tempo térmico para distintos subperíodos do ciclo em 2019. No entanto, para o período entre a semeadura e a emergência (S-EM) e após o final do período de florescimento até a maturação fisiológica (FF-G5), não houve variação na necessidade térmica em relação à ausência de drenagem superficial. No subperíodo S-EM à condição de homogeneidade na temperatura e umidade do solo contribuíram para uma condição uniforme na emergência para os distintos tratamentos em 2019.

No subperíodo emergência até final de roseta (EM-FR) em 2019, houve uma redução em torno de 4,3% no tempo térmico necessário com a utilização de drenos superficiais. Tartaglia (2016), em estudo sob excesso hídrico com e sem utilização de drenagem superficial do solo, também encontrou uma redução no subperíodo de EM-FR sob excesso hídrico, corroborando com os resultados deste trabalho para as condições adversas temporárias de encharcamento do solo. Em relação à safra 2018, houve uma redução de 5,1% em GD necessários para finalizar o subperíodo de roseta em 2019. Esta diferença pode estar associada à restrição hídrica de aproximadamente 30 DAS (Figura 2a) e a redução de disponibilidade de Rg em 2018 (Figura 3).

No subperíodo final de roseta até o início do florescimento (FR-IF) em 2019, o sistema sem drenagem necessitou 18,4% mais GD em relação a CD. O maior tempo ao qual as plantas permanecem nesse subperíodo muitas vezes não é considerado benéfico a cultura, pois além da manutenção das suas estruturas, existe a exposição mais prolongada a condições adversas do ambiente como geadas, granizo, ventos e chuvas fortes. Em 2019, este período foi caracterizado por vários eventos pluviométricos, com presença de elevação do lençol freático até a superfície no subperíodo associado à redução da disponibilidade de radiação solar. Neste sentido, destaca-se que a lâmina de chuva neste subperíodo em 2018 foi de apenas 49,4 mm. Já, em 2019 os eventos pluviométricos totalizaram 149,4 mm e 213,0 mm para os tratamentos com e sem drenagem superficial do solo, respectivamente (Figura 2b).

No período reprodutivo da cultura (IF-G5), a soma térmica acumulada apresentou interação significativa entre os fatores drenagem e espaçamentos apenas no ciclo de cultivo em 2019. O acúmulo térmico foi de 607,4 e 690,8 GD para o sistema com e sem drenagem superficial. Dentre os diferentes estádios no subperíodo reprodutivo em 2019, a duração do florescimento inicial (IF-G3) foi mais influenciada pela utilização de drenos superficiais, impactando na forma de redução em 34,5% a necessidade térmica para formação das primeiras síliquis até síliquis com 0,04 m (Tabela 1).

O florescimento (IF-FF) foi o subperíodo com maior redução na sua duração para as duas safras no período reprodutivo. Em 2018, a duração do subperíodo IF-FF foi de 520,8 GD, ou seja, 46,4 e 30,4% maior em relação a 2019 para os tratamentos com e sem drenagem superficial do solo. Em 2019, o subperíodo de florescimento sofreu um aumento de 29,8% na sua duração para tratamentos submetidos ao cultivo sem drenos superficiais quando comparado ao CD. A grande intensidade de chuvas durante o florescimento, com 284,4 e 99,2 mm respectivamente em 2018 e 2019, associados a eventos com 6, 5 e 3 dias consecutivos de chuva em 2018 podem estar relacionados ao aumento da necessidade térmica no subperíodo nos diferentes anos. Conforme Battisti et al., (2013), o abortamento e abscisão floral, além da foliar (SILVEIRA et al., 2014) e do estresse fisiológico (LIU et al., 2020), estão na necessidade de maior acúmulo térmico para completar o desenvolvimento dos subperíodos reprodutivos em canola.

Para mitigar o efeito da perda de estruturas reprodutivas e vegetativas em resposta ao excesso hídrico, a planta de canola, através de seu efeito compensatório, pode condicionar a emissão novas estruturas, como ramos laterais, folhas e flores (TOMM et al., 2014). Diante disto, pode-se inferir um aumento da duração deste subperíodo de forma mais intensa em resposta a recuperação da planta às condições de estresse ambiental. Trabalhos desenvolvidos por Zhou e Lin (1995), Fochesatto et al. (2014) e Tartaglia et al. (2018) corroboram com os resultados encontrados, em que os autores citados também observaram um aumento na duração subperíodo IF-FF para distintas cultivares em resposta ao excesso hídrico.

A utilização de drenagem superficial do solo no período de florescimento foi eficiente, reduzindo a necessidade de 22,9% em GD no seu tempo de desenvolvimento. Este menor período de antese se correlaciona positivamente com a produtividade de grãos (FOCHESATTO et al., 2014; KRÜGER et al., 2014). Na fase de enchimento dos grãos, compreendida ao subperíodo FF-G5 da cultura da canola, o fator dreno na safra 2019 não apresentou variação no acúmulo térmico, variando apenas com o ano de cultivo, em 2018. O maior subperíodo FF-G5 de 31,4% em 2019 correlacionou-se positivamente com a produtividade da cultura, induzida pelo maior tempo para translocação de fotoassimilados e enchimento de grãos,

3.3.3 Índice de área foliar

Na parametrização dos modelos não lineares para a estimativa do índice de área foliar (IAF) em ambiente de terras baixas com cultivo de canola, foram ajustados coeficientes aos parâmetros relacionados para descrever o crescimento e desenvolvimento da cultura. Os parâmetros a, b e c encontrados no modelo não linear (Anexo C), representam o IAF máximo, a necessidade térmica para atingir este IAF, e a longevidade do IAF durante o ciclo de desenvolvimento da cultura em função de necessidade térmica, respectivamente. Neste sentido, é importante a simplificação do número de modelos a serem utilizados para a estimativa do IAF da cultura durante seu desenvolvimento, reduzindo a necessidade de coeficientes ou parâmetros e a probabilidade de erros pelos distintos modelos de estimativa de IAF (NIED, 2013).

Em 2018, o índice de área foliar (IAF) foi influenciado de maneira significativa apenas pelo fator drenagem superficial do solo (Figura 5). Já em 2019, os fatores espaçamento e drenagem superficial interagiram na expressão do IAF na cultura (Figura 6).

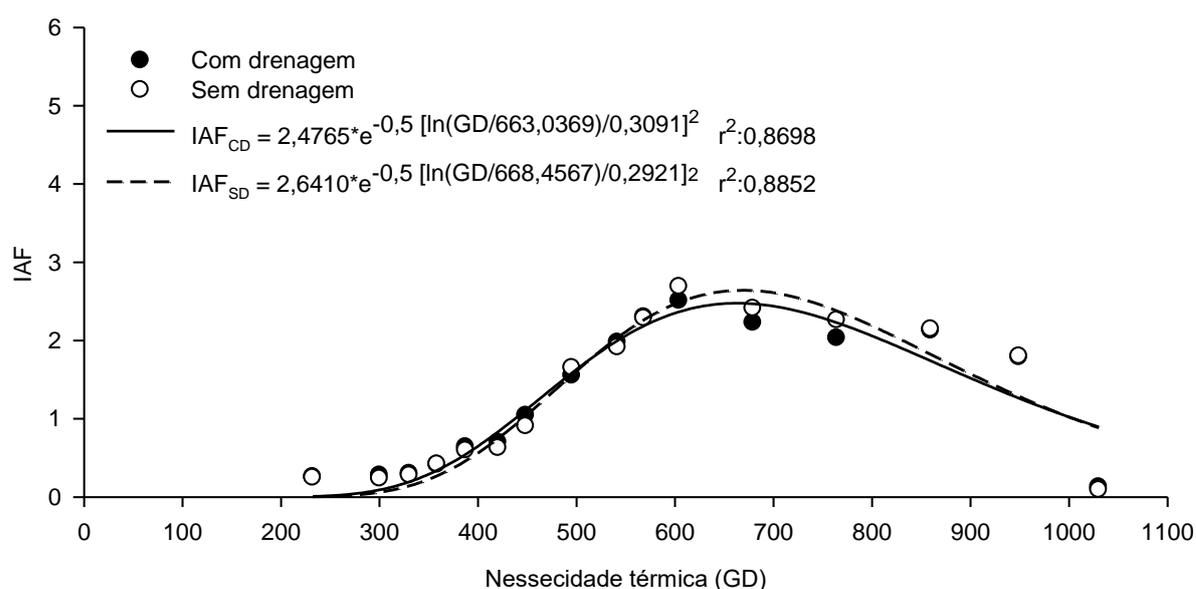
Em 2018, os modelos não lineares gerados foram muito similares entre si no fator espaçamento entre linhas de semeadura, cuja pequena variação nos parâmetros nos diferentes espaçamentos não comprometeu a utilização de modelo único para cada sistema de drenagem (Apêndice B). A plasticidade fenotípica que a canola apresenta pode estar relacionada à maior emissão de ramos e folhas para ocupar os espaços vazios, otimizando assim a interceptação de RFA mesmo sob variação de espaçamentos entre linhas de semeadura (BRACHTVOGEL et al., 2012; KRÜGER et al., 2011b; KRÜGER et al., 2017; WALKER et al., 2010).

Na presença de drenos em 2018, obteve-se a máxima emissão de área foliar mais precocemente e com longevidade superior. Porém, o IAF máximo foi ligeiramente menor ao observado em SD (Figura 5). Os menores valores de IAF máximo de 2,48 para o manejo com inserção de drenos superficiais em relação a 2,64 em SD, pode estar associado à resposta da planta em condição de excesso hídrico do solo (Figura 2a). A maior emissão de ramos laterais e sobre estes, folhas, em resposta morfofisiológica da planta acaba aumentando o número de folhas na planta, assim contribuindo em um maior IAF em SD. A intensidade do excesso hídrico também pode estar relacionada na concentração de ramos novos emitidos, assim, mesmo que plantas em SD apresentem menor longevidade de IAF, em resposta a abscisão foliar que em CD, o incremento maior via emissão de novas estruturas acaba condicionando este aumento no IAF máximo.

Sob condições de estresse por alagamento, o metabolismo aeróbico é substituído pelo catabolismo anaeróbico no sistema radicular das plantas e, em consequência, ocorre a produção de íons tóxicos e maior síntese de etileno, responsáveis pela abscisão foliar precoce e de estruturas reprodutivas (HABIBZADEH et al., 2013; KREUZWIESER; PAPADOPOULOU; RENNENBERG, 2004; SILVEIRA et al., 2014; TAIZ et al., 2017; ZHU, 2016). Para contornar a perda de IAF e manter a capacidade produtiva, a canola é estimulada a emitir novos ramos, aos quais estarão dispostos novas folhas, novo florescimento e emissão de novas síliquas (PLOSCHUK et al., 2018).

Na necessidade térmica em se atingir o IAF máximo, observou-se 663,1 e 668,4 GD, respectivamente, com e sem drenos superficiais (Figura 5). A necessidade térmica menor em CD para ocorrência do IAF máximo pode estar associada ao menor efeito deletério do excesso hídrico, com aumento da camada aerada em subsuperfície e/ou a redução do nível do lençol freático mais rápida e prolongada nos subperíodos de roseta (FR) e alongação da haste da cultura em 2018. Além disso, o maior IAF observado nos subperíodos iniciais de desenvolvimento da cultura até a soma térmica acumulada de 512,8 GD para CD, podem ter contribuído para maior acúmulo de fotoassimilados. Conforme Edwards e Hertel (2011), a maior disposição de folhas no subperíodo de roseta é importante no processo de alongamento da haste de canola, condicionando a um melhor florescimento inicial da cultura e resguardando sua capacidade produtiva. Além disso, a manutenção do IAF por um período maior condiciona à redução de gasto energético para emissão de novas folhas nas plantas, além da interceptação maior de RFA para acúmulo de fotoassimilados (KRÜGER et al., 2011a; KRÜGER et al., 2017).

Figura 5 – Modelo de ajuste não linear do índice de área foliar (IAF) em função do acúmulo térmico (graus-dia) em 2018 para a inserção de drenagem superficial do solo (CD) e na sua ausência (SD), no cultivo de canola em ambientes com excesso hídrico do solo. Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

Neste contexto, a utilização de drenagem superficial do solo para cultivo de canola em ambientes com solos característicos aos encontrados na metade sul do Estado do Rio Grande do Sul perfaz uma necessidade para a otimização das áreas produtivas de terras baixas. Estes solos possuem perfil gleissólico com presença de elevação do lençol freático próximo à superfície em períodos chuvosos com saturação hídrica superficial, principalmente entre maio e setembro, quando é cultivada a cultura da canola nestes ambientes (SANTOS et al., 2018). Neste sentido, a utilização de drenos superficiais busca a drenagem mais eficiente, com elevação do lençol freático menos intensa.

Na safra 2019, houve interação entre espaçamentos e drenagem superficial do solo, com IAF máximo no espaçamento 0,68 m, respectivamente de 3,94 e 1,56 para CD e SD (Figura 6). A diminuição do espaçamento entre linhas afetou negativamente o IAF máximo. Em CD, taxas de 1,6, 6,6 e 16,0% foram as magnitudes do decréscimo no IAF máximo, em relação à redução de 0,68 m para 0,51, 0,34 e 0,17 m no espaçamento entre fileiras, respectivamente (Figura 6a). Em SD, as reduções foram ainda mais significativas aos observados em CD, com 9,6, 15,4 e 25,0% de redução do IAF na diminuição do maior espaçamento em relação aos inferiores testados (Figura 6b). Estes resultados corroboram com Chavarria et al. (2011), para modificação do espaçamento de plantas de canola na linha de semeadura, que também encontraram resposta linear para incremento de IAF quando aumentou o espaçamento de 0,17 a 0,68 m.

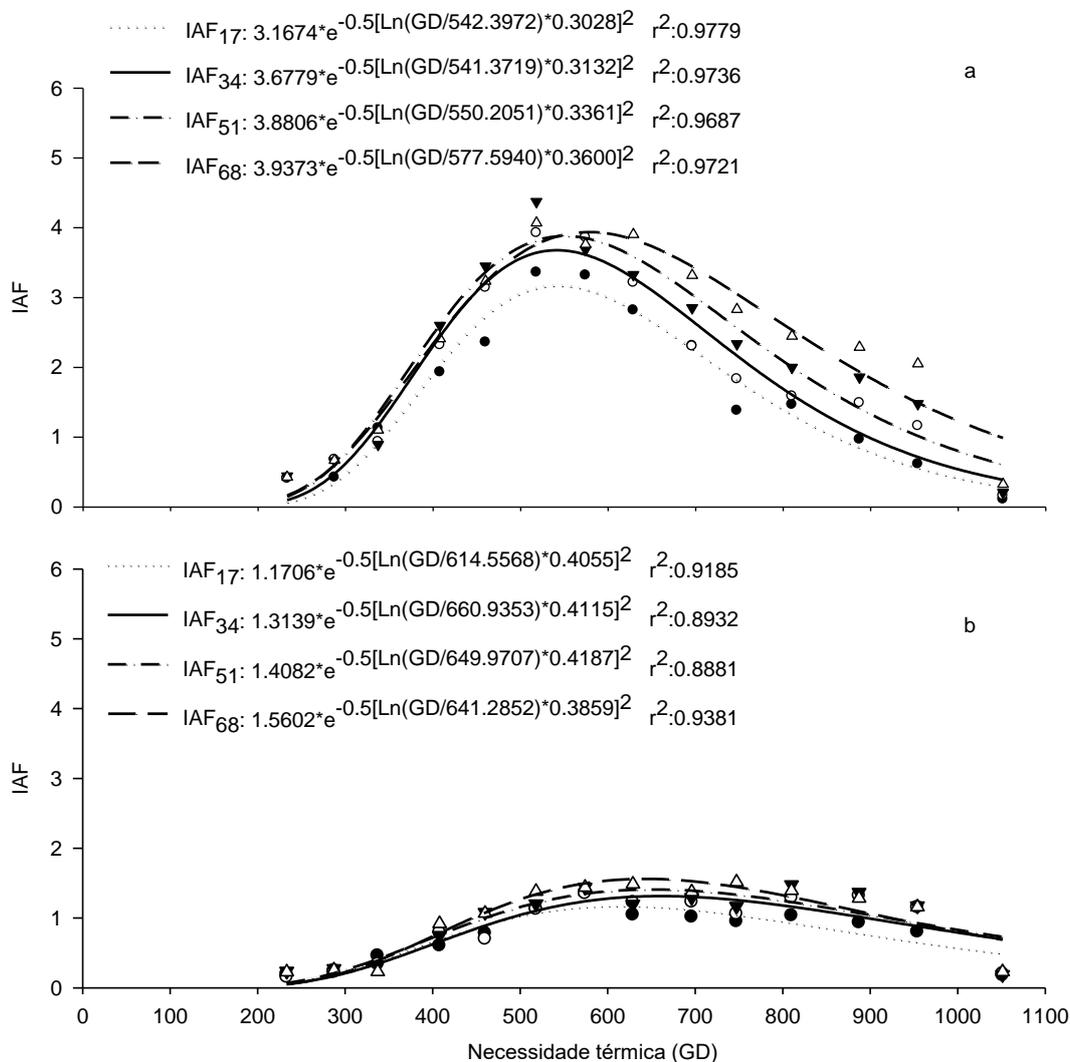
A modificação do arranjo espacial de plantas nos sistemas de cultivo confere condições de alteração da interação vegetal com a RFA, podendo ocasionar o encurtamento do período para que a cultura intercepte o máximo de RFA por unidade de área e tempo (KRÜGER et al. 2017). Na modificação do arranjo espacial para o sistema drenado em 2019, os modelos apresentaram similaridade para o crescimento rápido do IAF até o início do florescimento, em 520,2 GD, apresentando apenas variação para o espaçamento 0,17 m. Neste sentido, pode-se inferir que espaçamentos mais equidistantes condicionam uma menor expansão foliar para a interceptação máxima de RFA. Em espaçamentos maiores, como em 0,68 m, muitas folhas ficam sobrepostas, necessitando assim para a planta emitir mais estruturas laterais na tentativa de obter maior RFA interceptada (KRÜGER et al., 2011b; KRÜGER et al., 2017).

O acúmulo térmico necessário para obtenção do máximo IAF apresentou pouca variação entre os espaçamentos testados, sendo a maior diferença observada entre CD e SD. Na análise do fator drenagem superficial do solo isolado, observou-se em 2019, GD médios de 552,9 e 641,7, respectivamente em CD e SD. Assim, a maior necessidade térmica para obtenção do IAF máximo em ambientes sem drenagem pode ser atribuída à diminuição da camada aerada e remoção mais lenta do excesso hídrico do solo (Figura 1b). Em solos alagados ocorrem alterações fisiológicas na planta que podem estar associados a expansão foliar mais lenta, aumento da abscisão foliar e desenvolvimento das gemas axilares, como o aumento da síntese de etileno e a alteração do efeito regulatório da auxina sobre a citocininas (TAIZ et al., 2017). A maior concentração de etileno na planta pode ser constatada pelo aumento de pelos radiculares e abscisão foliar, observados em decorrência do excesso hídrico mais intenso (Apêndice F).

Em 2019, na ausência de drenos superficiais, a necessidade térmica para o IAF máximo foi inferior nos espaçamentos extremos de 0,17 e 0,68 m, o que induz que a equidistância e a competição intraespecífica podem estar associadas à maior precocidade (Figura 6b). Em CD, o espaçamento 0,34 m também foi superior ao 0,17 m na necessidade em GD para obtenção do IAF máximo, porém a presença de drenagem aumentou em 6,7% a necessidade térmica para o 0,68 m. Neste sentido, pode-se destacar que a presença de excesso hídrico do solo na fase do crescimento vegetativo de canola também pode estar influenciando a velocidade de emissão de folhas.

Em solos sob excesso hídrico, o sistema radicular das plantas apresenta seu desenvolvimento comprometido, limitando a absorção de nutrientes e água, necessária para a síntese foliar (ZHU, 2016). Além disso, as alterações fisiológicas decorridas do efeito de excesso hídrico na planta, como acúmulo de etileno, limitam a disponibilidade de energia e apresentam abscisão foliar precoce que necessita ser recomposta para a assimilação de fotoassimilados (SILVEIRA et al., 2014).

Figura 6 – Modelos de ajuste não linear do IAF de canola em função do acúmulo térmico (graus-dia) para semeadura realizada em 06 de junho de 2019 em diferentes espaçamentos e em ambiente com drenagem superficial do solo (a) e sem drenagem na área (b). Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

O potencial produtivo da cultura está diretamente atrelado à capacidade de interceptação da RFA pelo dossel de canola, sendo assim, a manutenção do IAF máximo contribui para o maior acúmulo de fotoassimilados. Esta maior integridade do IAF apresenta maior importância no subperíodo IF-G3, aonde as folhas apresentam a maior contribuição na interceptação de RFA, pois com o avanço do desenvolvimento, as estruturas reprodutivas (síliquas, hastes e flores) promovem sombreamento nas folhas e passam a interagir predominantemente com a RFA, passando a representar juntos aproximadamente 65% da fotossíntese total realizada pela planta (hastes: 50% e síliquas: 15%) (EDWARDS; HERTEL, 2011;

FOCHESATTO et al., 2016; MOGENSEN et al., 1997; THOMAS, 2003). Assim, é necessário às plantas atingirem o IAF máximo de forma precoce para condicionar um maior aproveitamento da radiação solar, e este ser duradouro em seu ciclo de desenvolvimento.

Os modelos de estimativa de IAF para a safra 2019 possuem para o parâmetro da longevidade do IAF (Anexo C) valores variando de 0,30 a 0,36 em CD e para SD, valores de 0,38 a 0,41 foram obtidos nos distintos espaçamentos. No sistema com drenagem superficial, o espaçamento 0,68 m apresentou a maior longevidade do IAF e conforme se diminui o espaçamento entre fileiras de plantas, este parâmetro apresentou decréscimo. Para SD, o espaçamento 0,51 m teve a maior longevidade do IAF, com aproximadamente 0,42, sendo que a partir deste espaçamento, houve redução conforme diminuiu o espaçamento entre fileiras.

Em ambientes com elevação do lençol freático até a superfície do solo e sua permanência por períodos prolongados, como encontrado na safra 2018 e 2019 para SD, o valor estimado através da equação não linear para IAF referente à sua longevidade, pode estar superestimado. Isto se deve à constante emissão de novas estruturas em função da abscisão foliar e floral, que confere um comportamento de redução mais gradativa de perda do IAF (SILVEIRA et al., 2014). A emissão de folhas no formato lanceoladas no estágio final do período vegetativo e reprodutivo em novos ramos laterais contribui para atenuar a perda de IAF e condicionar a planta capacidade em interceptar RFA para produção de fotoassimilados a serem translocados na fase de enchimento de grãos (TARTAGLIA, 2016).

Através dos modelos de estimativa de IAF nos distintos ciclos e condições de cultivo, foi possível destacar que as condições ambientais têm influência direta no crescimento da cultura da canola. O excesso hídrico do solo destaca-se como uma condição de estresse deletéria para a canola, pois interfere diretamente na capacidade de emissão de folhas e manutenção do IAF para expressão da capacidade produtiva da cultura (TARTAGLIA, 2018; THOMAS, 2003). Nestes ambientes, a modificação do espaçamento entre plantas tem relação direta no retardamento da emissão máxima do IAF e sua longevidade (KUNZ et al., 2007; ZHOU et al., 2020).

3.3.4 Interação da RFA com o dossel

Em ambos os anos de cultivo, a eficiência de interceptação (ϵ_i) foi afetada significativamente pela utilização de drenagem e pelo espaçamento entre fileiras de semeadura, com resposta quadrática para ajuste de seus modelos. Os coeficientes de determinação obtidos nos modelos variaram de 0,88 a 0,97 em 2018 (Figura 7) e de 0,78 a 0,93 em 2019 (Figura 8). Os ajustes observados ressaltam que a necessidade térmica acumulada representa um bom indicador de estimativa da eficiência de interceptação por meio de modelo quadrático.

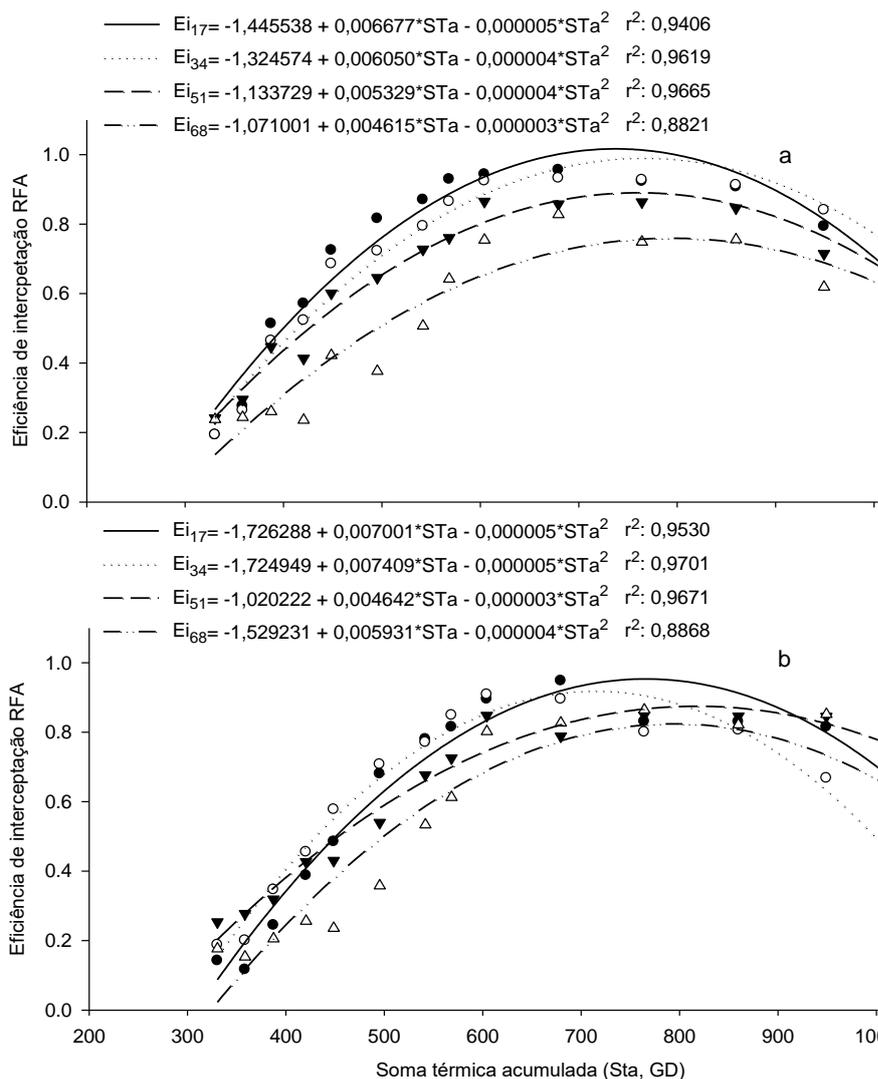
Em 2018, para o sistema drenado observou-se uma ϵ_i máxima maior no espaçamento 0,17 m, sendo que com aumento no espaçamento entre linhas obteve-se uma redução (Figura 7a). Estes maiores valores de ϵ_i foram observados durante o pleno florescimento da cultura, entre 737,7 e 792,3 GD, respectivamente para o espaçamento 0,17 e 0,68m. Na ausência de drenos, a ϵ_i apresentou mesma tendência, porém os valores de interceptação máxima para RFA foram inferiores aos observados em CD (Figura 7b). Ambos os valores de ϵ_i foram observados entre 718,6 e 814,2 GD, respectivamente nos espaçamentos extremos.

Na máxima emissão de área foliar estimada nos modelos não lineares em 2018 (Figura 5), observa-se valores ainda crescentes para ϵ_i , sendo que em CD para o acúmulo térmico de 663,0 GD foram observados eficiências de interceptação da RFA de 97,6, 96,0, 96,4 e 93,6%, respectivamente para os espaçamentos 0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m. Valores semelhantes foram observados em SD comparados ao CD em 2018, o que demonstra que em ambos sistemas com e sem drenagem superficial do solo, a ϵ_i é influenciada também por outras estruturas, tanto vegetativas como reprodutivas que interceptam a RFA. Conforme Fochesatto et al. (2016), a partir do índice de área foliar máximo, as hastes, flores e síliquas se tornam as estruturas mais eficientes na interceptação de RFA. Assim, o aumento da emissão de ramos e flores na condição excesso hídrico corrobora com o aumento na ϵ_i .

Em 2019, no desdobramento da interação significativa para a eficiência de interceptação observou-se uma maior ϵ_i em todos os espaçamentos na presença de drenos superficiais no solo. Em CD, eficiências de interceptação de RFA pelo dossel vegetal de 98,3, 99,9, 99,9 e 96,3% foram observados nos modelos para os espaçamentos 0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m, respectivamente (Figura 8a). A maior ϵ_i

nos espaçamentos intermediários pode estar relacionado ao maior número de estruturas reprodutivas como sílikas, que foram observadas em maior concentração nos espaçamentos 0,34 e 0,51 m.

Figura 7 - Eficiência de interceptação (ϵ_i) da radiação fotossinteticamente ativa em dossel de canola submetida a um sistema de drenagem superficial do solo (a: com drenos, b: sem drenos) e diferentes espaçamentos entre linhas (0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m) em 2018. Santa Maria, RS, 2021

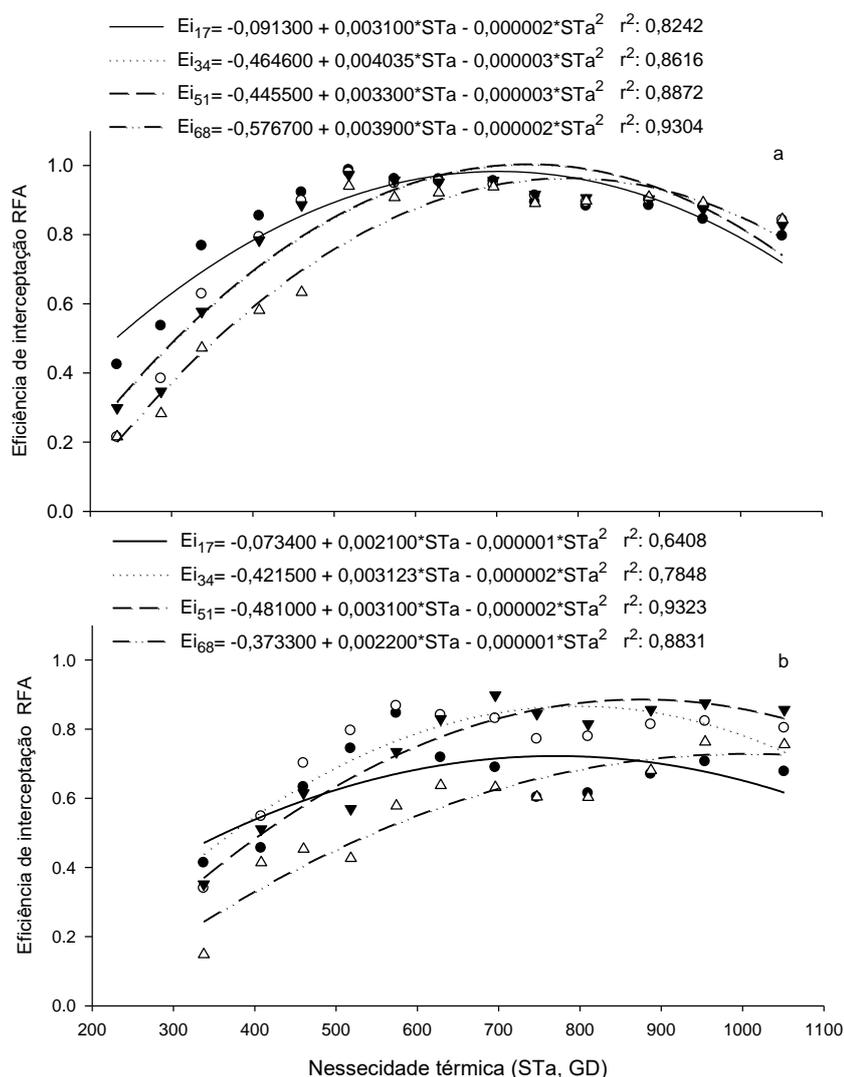


Fonte: Autor.

Além disso, quando analisada a ϵ_i na máxima expansão foliar da cultura, o espaçamento 0,17 m apresentou melhor interceptação, com eficiência de 92,7%, em relação aos 90,0 % obtidos em 0,34 e 0,51 m. Neste sentido, o aumento da expressão de estruturas vegetativas e reprodutivas em espaçamentos com maior competição intraespecífica na linha de semeadura e na redução natural do IAF, órgãos como ramos, flores e sílikas passam a ter grande importância na

interceptação de RFA (FOCHESATTO et al., 2016). Conforme Thomas (2003), no terço final do subperíodo de florescimento da canola, a interceptação de RFA por siliquis e ramos passa a contribuir majoritariamente na produção de fotoassimilados, resultando em valores aproximados de 2/3 da fotossíntese total da planta.

Figura 8 - Eficiência de interceptação de RFA (ϵ_i) em dossel de canola submetida a diferentes espaçamentos entre linhas (0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m) e sistema de drenagem superficial do solo (a: com drenagem, b: sem drenagem) em 2019 em terras baixas. Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

A canola submetida a ausência de drenos em 2019 também apresentou maior eficiência de interceptação de RFA nos espaçamentos intermediários (0,34 e 0,51 m), com 86,8 e 88,5%. Os espaçamentos 0,17 e 0,68 m por sua vez apresentaram respostas similares de máxima ϵ_i , com 72,3 e 72,8%, respectivamente. Este

resultado pode estar associado à grande redução do IAF nestes espaçamentos em resposta ao excesso hídrico do solo, associados a limitação de reservas na planta no espaçamento 0,68 m com maior competição intraespecífica e falta de novas estruturas vegetativas em 0,17 m ocasionadas pela melhor equidistância espacial. Aliado a isso, quando analisada a ϵ_i na máxima emissão de IAF observa-se valores ainda mais acentuados entre os espaçamentos, com eficiências de interceptação de 68,9, 83,1, 79,5 e 58,5% observadas nos espaçamentos 0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m, respectivamente.

Na necessidade térmica para a obtenção da máxima eficiência de RFA na cultura da canola, observou-se comportamentos similares para variação do espaçamento entre linhas de semeadura nos ambientes com e sem drenagem superficial do solo e anos de cultivo. No espaçamento 0,17 m constatou-se a menor necessidade térmica para a obtenção da ϵ_i máxima, e para aumentos na distância entre as fileiras de plantas, ocorre um acréscimo na necessidade térmica, sendo no espaçamento 0,68 m foi observado o maior GD acumulado. Esse comportamento pode estar associado a capacidade de crescimento da cultura em ocupar espaços vazios, através da plasticidade fenotípica (KRÜGER et al., 2011b; KRÜGER et al., 2017), sendo verificada a necessidade de um período superior para o fechamento do dossel em espaçamentos com maior competição intraespecífica. A maior sobreposição de folhas em espaçamentos maiores também pode determinar redução da capacidade de interceptação de RFA, principalmente nos subperíodos iniciais da cultura da canola. Aliado a isso, a emissão de folhas maiores pode favorecer um fechamento mais rápido do dossel vegetal em arranjos mais equidistantes (ALFAZL, 2010; TARTAGLIA, 2016; TARTAGLIA et al., 2018). Os resultados de ϵ_i na fase vegetativa da canola corroboram com esta suposição, onde observa-se relação direta entre espaçamento e a interceptação de RFA pelo dossel de plantas.

O excesso hídrico também apresenta influência sobre a eficiência de interceptação da RFA, pois seus efeitos deletérios interferem na capacidade de emissão de novas estruturas, longevidade do IAF, assimilação de compostos de reserva e seu metabolismo (BARRERA-ROJAS et al., 2020; KRÜGER et al., 2011a; SILVEIRA et al., 2014). Em ambientes com elevação do lençol freático do solo, espaçamentos de 0,34 m apresentam maior eficiência de interceptação de RFA, principalmente na fase vegetativa. Assim, em 0,34 m, a menor competição

intraespecífica da canola em relação a 0,51 e 0,68 m, favoreceu a um melhor desenvolvimento da cultura. Este resultado corrobora com Dalmago et al. (2018) no Sul do Brasil, onde observaram ϵ_i de 93,0% em canola submetida ao espaçamento 0,34 m e 40 plantas m^{-2} .

Ambientes com excesso hídrico ainda carecem de informações sobre a influência do estresse na capacidade de interceptação de radiação. Na literatura, trabalhos abordam basicamente o efeito do índice de área foliar, épocas de semeadura e diferentes arranjos espaciais sobre a capacidade de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa. Neste sentido, valores de ϵ_i observados em CD foram até superiores aos resultados obtidos por outros autores em ambientes sem presença de excesso hídrico. Biabani et al. (2021) obtiveram ϵ_i acima de 90,0% em distintas épocas de semeadura, já Singh, Singh e Kingra (2018), na Índia, observaram eficiências de interceptação de 79,5 e 91,3% para canola semeada mais precocemente e mais tardiamente ao período de semeadura. Rondanini et al. (2017) em distintos arranjos espaciais, que variaram de 15 a 240 plantas m^{-2} , e distintos genótipos de canola, observaram valores de ϵ_i em torno de 95,0%. Kuai et al. (2015), no sudeste da China avaliando distintos espaçamentos e densidades de semeadura de canola, observaram também interceptação em 90%, porém com linhas espaçadas em 0,35m sob densidade similar à empregada neste trabalho.

Na comparação com o IAF, Edwards e Hertel (2011) encontraram eficiências de interceptação de 90,0% em índice de área foliar igual a 4. Porém Nied (2013), observou uma eficiência de interceptação de 94,0% para IAF 1,9, em cultivo para latitude próxima às deste trabalho no espaçamento de 0,20 m. Neste sentido, valores observados no experimento, principalmente em 2018 passam a corroborar com resultados abordados na literatura.

Conforme Nied (2013) e Brunel-Muguet et al., (2013), folhas sombreadas tornam-se um dreno de fotoassimilados na planta. Assim, a planta em condição de estresse pode realizar o ajuste da área foliar, ocasionando a remobilização de fotoassimilados e a abscisão de folhas sombreadas. Para Taiz et al. (2017), este ajuste entre fonte e dreno é essencial para assegurar o potencial produtivo da cultura, sob influências abióticas, como o excesso hídrico, podendo este intensificar este processo. Assim, IAF menores observados em 2018, decorrentes do aumento do excesso hídrico e redução da disponibilidade de radiação solar podem estar relacionados a melhor disposição das folhas na arquitetura da planta,

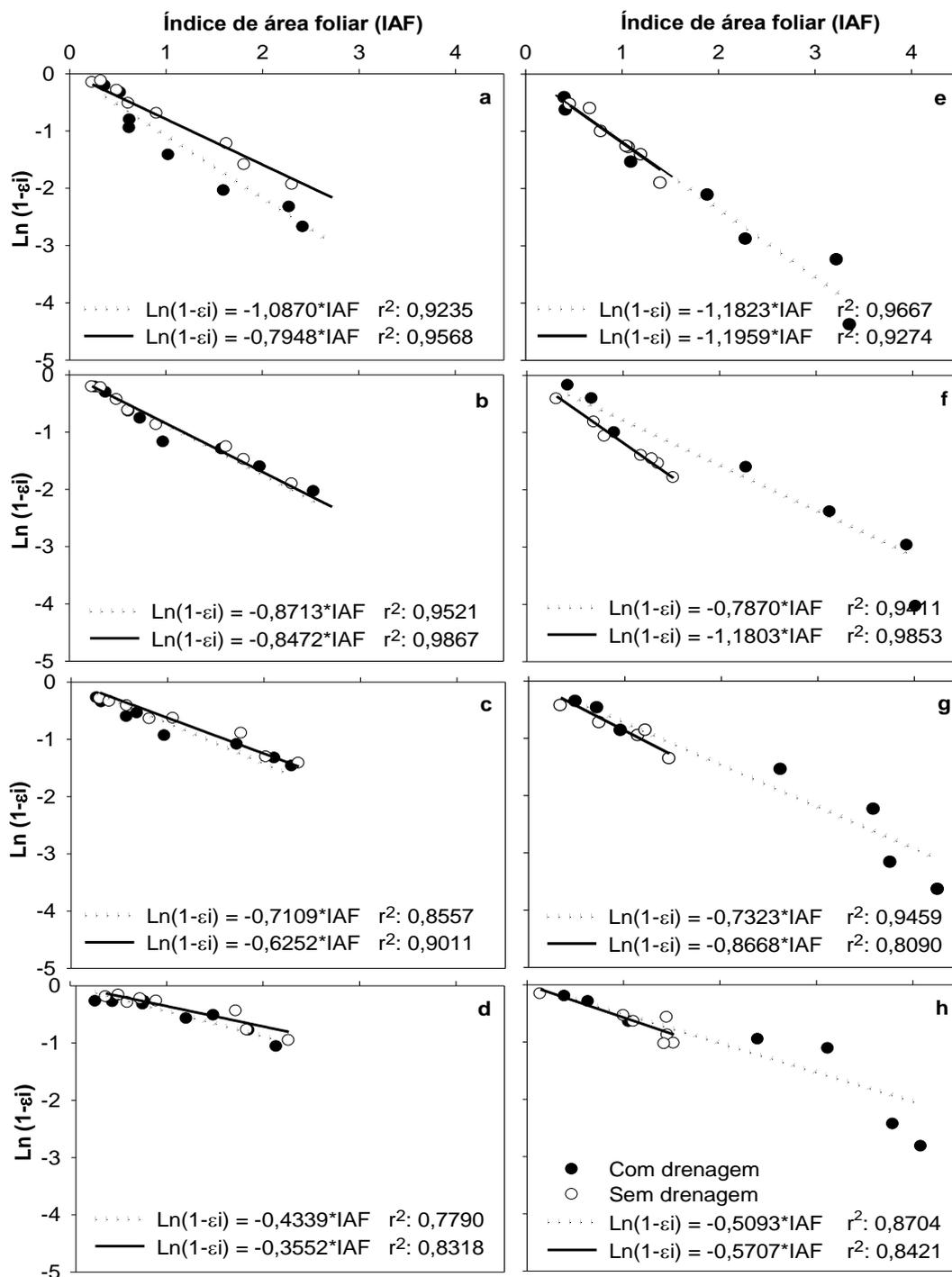
proporcionando maiores eficiências de interceptação de RFA por unidade de área foliar. Müller e Bergamaschi (2005), salientam ainda que a declinação solar também pode ter relação na interceptação de RFA em dossel vegetal. Em estudo com a cultura do milho, observaram influência do sombreamento de uma fileira sobre a outra, sendo neste sentido, menores valores de IAF necessários para se alcançar valores mais elevados de interceptação da RFA no dossel vegetal.

Nos períodos experimentais de 2018 e 2019, no coeficiente de extinção (k) houve interação significativa entre o fator drenagem e fator espaçamento entre linhas de semeadura (Figura 9). Para o fator espaçamento entre linhas de semeadura, a redução exponencial da RFA transmitida pelo dossel de canola foi maior em 0,17 m em ambos os sistemas com e sem drenagem superficial do solo e anos de cultivo. Para o aumento do espaçamento entre as linhas de semeadura, o coeficiente de extinção decresceu conforme aumentou a distância entre fileiras.

Em 2018, os valores de k em CD variaram de 1,08 a 0,43, e em SD permaneceram entre 0,79 e 0,35, respectivamente para o menor espaçamento (0,17 m) e maior espaçamento (0,68 m) (Figura 9a/9d). Em 2019, observou-se o mesmo comportamento para os respectivos espaçamentos, variando de 1,18 a 0,50 em CD, e 1,19 a 0,57 em SD (Figura 9e/9h). Estes resultados corroboram aos encontrados por Nied (2013), que em distintos anos para diferentes genótipos e épocas de semeadura, observou para espaçamento reduzido de 0,20 m e 40 plantas m^{-2} um k médio de 0,98. Dalmago et al. (2018) também observaram resultados condizentes, no espaçamento de 0,34 m com 40 plantas m^2 ao observarem k de 0,70 e 0,89 em dois anos seguidos de cultivo de canola em latitudes similares em ambientes de coxilha.

A presença de drenos em 2018 determinou k maiores em relação à sua ausência em 36,8, 2,8, 13,7 e 22,2%, respectivamente, para espaçamentos de 0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m (Figuras 9a, 9b, 9c, 9d). Porém em 2019, os coeficientes apresentaram reduções para utilização de drenagem superficial do solo em relação à sua ausência, com coeficientes inferiores de 1,1, 33,3, 15,5, 10,7%, respectivamente, para 0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m de espaçamento (Figura 9e, 9f, 9g, 9h).

Figura 9 – Coeficiente de extinção (k , parâmetro angular) da RFA em dossel de plantas de canola submetidos à variação de espaçamento entre linhas de semeadura em sistema com drenagem superficial do solo (.....) e sua ausência (—) em 2018 (a: 0,17 m; b: 0,34 m; c: 0,51 m; d: 0,68 m) e 2019 (e: 0,17 m; f: 0,34 m; g: 0,51 m; h: 0,68 m) para a cultura da canola em terras baixas. Santa Maria, RS, 2021



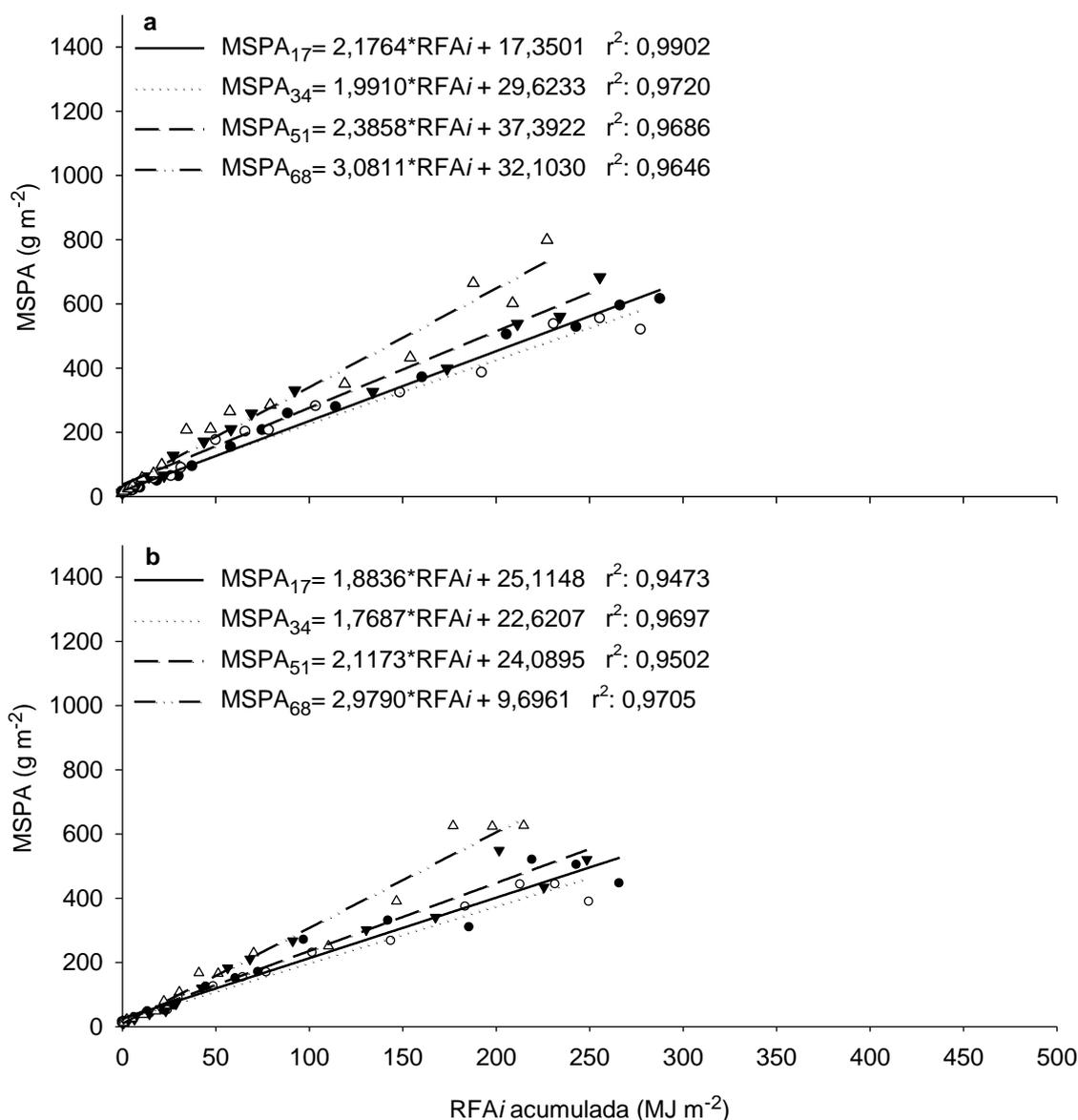
Fonte: Autor.

O valor do K superior a 1,00 pode estar associado a presença de outros componentes que interceptam RFA em canola além das folhas, como ramos, flores e síliquis, assim gerando uma imprecisão na geração do modelo (MONSI; SAEKI, 1953; NIED, 2013). Conforme Fochesatto et al. (2016), as estruturas reprodutivas são responsáveis por grande parte da interceptação da RFA no período reprodutivo da cultura, atingindo coeficientes de extinção médios de 0,44 para RFA em canola. Outros valores de 0,50 (ANDERSEN; HEIDMANN; PLAUBORG, 2009) e 0,41 (FRAY et al., 2009) para k reforçam a influência das síliquis e flores na interceptação de radiação fotossinteticamente ativa em dossel de canola.

Para cultivo de canola em ambiente de terras baixas, susceptíveis ao excesso hídrico do solo, a utilização de drenagem superficial do solo confere coeficientes de extinção da RFA em dosséis similares aos ambientes de coxilha, aonde a presença de excesso hídrico do solo é muito limitada. A utilização de espaçamentos reduzidos nestes ambientes de cultivo proporciona a otimização da interação das plantas com a radiação solar. Assim, podem favorecer o aparato fotossintético na assimilação de reservas que serão imprescindíveis no desenvolvimento da cultura e enchimento dos grãos. Segundo Bergamaschi e Bergonci (2017), o ajuste do arranjo espacial de plantas é fundamental para a redução do impacto negativo da competição intraespecífica por RFA, sendo imprescindível a escolha correta do espaçamento entre linhas de semeadura para assegurar o potencial produtivo de grãos.

A eficiência do uso da radiação solar (EUR) foi significativamente afetada pela interação entre os fatores de drenagem e espaçamento entre linhas de semeadura em cultivo de canola em terras baixas em 2018 (Figura 10) e 2019 (Figura 11). O ajuste linear se correlacionou bem com os resultados obtidos durante todo ciclo de desenvolvimento da cultura, apresentando coeficientes de determinação altos, que em 2018 e 2019 variaram entre 0,89 e 0,99 (Figura 10 e 11). Conforme Bergamaschi e Bergonci (2017), a simplificação do modelo para o ajuste linear com a utilização da interceptação de RFA em vez de soma térmica, retrata bem o período de máxima taxa de crescimento em culturas, sendo os incrementos curvilíneos no início e fim de ciclo (modelo sigmóide) atenuados pela utilização da EUR média.

Figura 10 – Eficiência do uso da radiação (EUR, g MJ⁻¹), representado pelo coeficiente angular da regressão linear entre a matéria seca da parte aérea (MSPA) e o acúmulo de radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAi) pela canola em sistemas com (a) e sem (b) drenagem superficial do solo para diferentes espaçamentos de 0,17 m, 0,34 m, 0,51 m e 0,68 m no ano de 2018. Santa Maria, RS, 2021

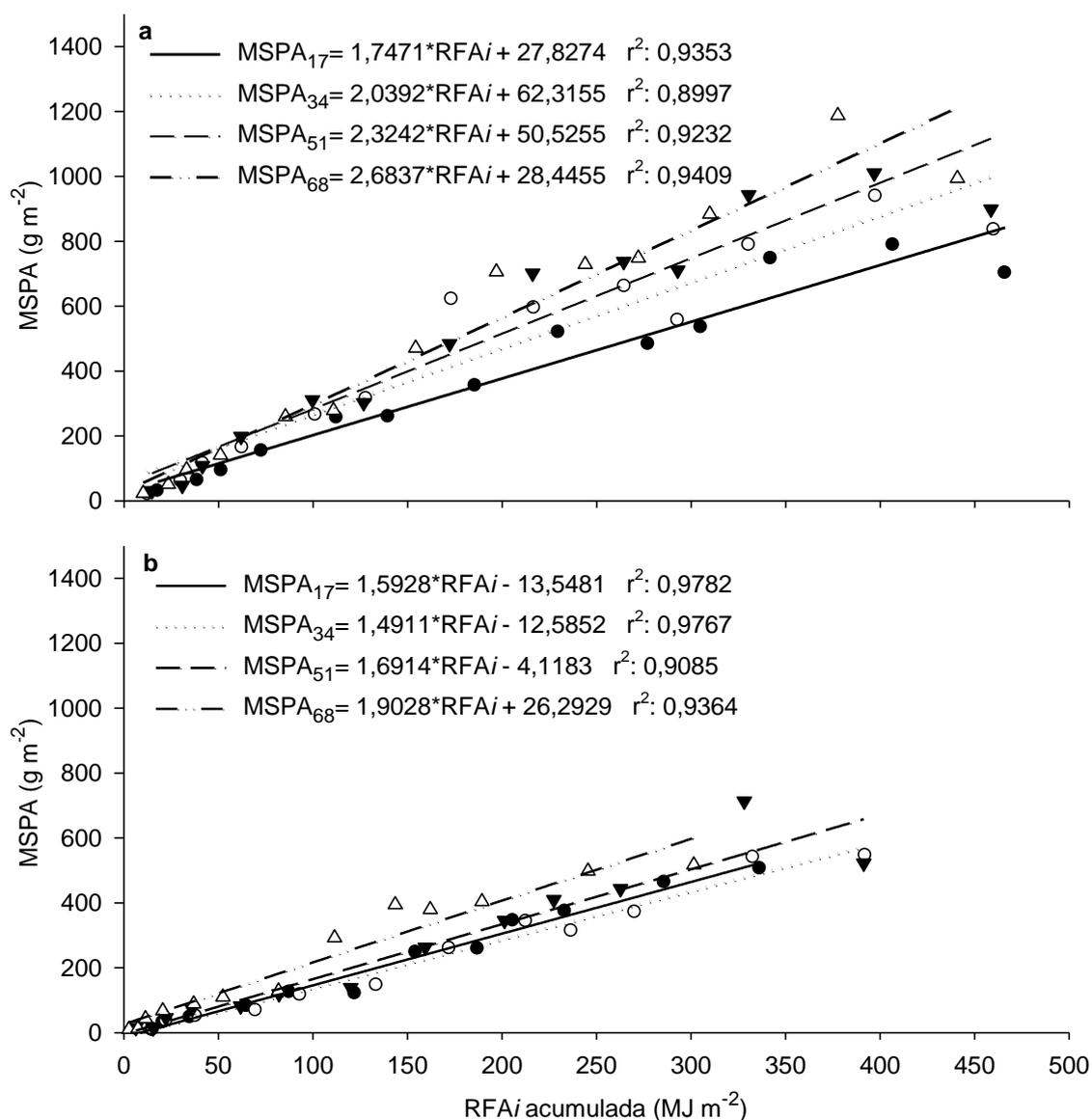


Fonte: Autor.

Nos ajustes dos modelos, o maior espaçamento (0,68 m) apresentou produção de biomassa superior por unidade de RFA interceptada em 2018 e 2019, como também na presença e ausência de drenos no sistema de cultivo. O maior incremento de biomassa por MJ de RFA interceptada pode estar relacionado a plasticidade fenotípica da cultura (KRÜGER et al., 2011b; KRÜGER et al., 2016),

onde a maior emissão de estruturas como ramos laterais (Apêndice G) podem ter aumentado substancialmente a produção de MSPA. Conforme Brunel-Muguet et al. (2013) a canola tende a compensar o aumento do sombreamento na linha de semeadura com a emissão de ramificações laterais para otimizar a interceptação de radiação solar.

Figura 11 – Eficiência do uso da radiação (EUR), representado pelo coeficiente angular da regressão linear entre a matéria seca da parte aérea (MSPA) e o acúmulo de radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAi) pela canola em sistemas com (a) e sem (b) drenagem superficial do solo para diferentes espaçamentos entre fileiras de plantas no ano de 2019. Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

Já a menor EUR foi observada em espaçamentos reduzidos, sendo que para 0,34 m ocorreu menor acúmulo de matéria seca da parte aérea (MSPA) por unidade de RFA interceptada em SD nos diferentes anos (Figura 10 e 11). Já para a utilização de drenagem superficial do solo, o espaçamento 0,17 m apresentou menor EUR em 2019. Porém, em 2018, observou-se em 0,34 m eficiência de uso da radiação 14,3% menor que em 0,17 m (Figura 11a).

O modelo linear de determinação da eficiência de conversão da RFA em biomassa ajustado para canola em terras baixas em 2018 foi superior em CD comparada a SD, com EUR superior em 15,54, 12,56, 12,68 e 3,42%, respectivamente, para os espaçamentos 0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m entre fileiras (Figura 10). Em 2019, essas eficiências determinaram incrementos de EUR na ordem de 9,68, 36,75, 37,41 e 41,10% para os mesmos espaçamentos em CD comparado ao SD (Figura 11). Isto indica que a utilização de drenos no cultivo de canola permitiu um aumento na EUR em ambos os anos, com 0,21 e 0,43 g MJ⁻¹ na média em relação a SD, respectivamente, em 2018 e 2019.

A EUR média de 2,40 g MJ⁻¹ obtida em 2018 em CD sob presença de excesso hídrico pela elevação do lençol freático do solo (Figura 2a) demonstra que a utilização de drenos em lavouras de canola em terras baixas é eficiente para manter satisfatório o incremento de massa de matéria seca (Figura 10a). Estes resultados são semelhantes a canola cultivada em coxilha, onde Nied (2013) observou valores de EUR, que variaram de 1,91 a 2,80 g MJ⁻¹ em dois anos e épocas de semeadura distintas. Na Austrália em três anos de cultivo em condições de ambientes mais secos, Zhang e Flottmann (2016) observaram uma eficiência de uso de radiação de 1,74 g MJ⁻¹.

Os valores de 2,20 e 1,77 g MJ⁻¹ para EUR observados em 2019 em CD e SD, foram inferiores a 2018, com eficiências menores em 8,3 e 19,2% respectivamente. Esse resultado pode estar atrelado a maior disponibilidade de radiação solar global (Rg) em 2019 (Figura 3, Apêndice I), proporcionando assim, menores valores de EUR para a canola. Em 2018 acumulou-se 1399,25 MJ m⁻² desde a EM até G5, já em 2019, foram computados 1589,64 MJ m⁻², representando um aumento de 13,6% na disponibilidade. Este comportamento corrobora com resultados de Radin et al. (2003) em tomateiro, onde encontraram para maior disponibilidade de RFA, menor capacidade de acúmulo de biomassa por MJ de radiação interceptada.

A redução da EUR pode também estar atrelada a outros fatores que tangem o crescimento e desenvolvimento da cultura. Conforme Schöffel e Volpe (2001), diferenças na interceptação da radiação fotossinteticamente ativa, duração do ciclo da cultura e incremento de IAF podem estar relacionados à maior eficiência de utilização da radiação na conversão de matéria seca. Neste sentido, os resultados obtidos nesse estudo corroboram para redução do ciclo de desenvolvimento da cultura, menores EUR foram observados, sendo que para 2019, a duração do ciclo da cultura foi mais curto em 16 e 6 dias, respectivamente, em CD e SD em relação à 2018 (Tabela 2).

3.4 CONCLUSÕES

O uso do sistema de drenagem superficial do solo possibilita o cultivo de canola em solos com problemas de elevação do lençol freático.

Solos com excesso hídrico reduzem o desenvolvimento vegetal, ocasionado maior tempo térmico para a obtenção do IAF máximo.

A constante emissão de novas estruturas vegetativas e reprodutivas em resposta ao excesso hídrico ocasiona uma maior longevidade do IAF máximo da cultura.

O aumento do espaçamento entre linhas de cultivo condiciona incremento de índice de área foliar.

Espaçamentos reduzidos entre linhas de plantas apresentam maior capacidade de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa no período vegetativo.

O coeficiente de extinção da radiação fotossinteticamente ativa em dossel de canola decresce com o aumento do espaçamento entre linhas de plantas em terras baixas com excesso hídrico.

Aumento no espaçamento entre linhas proporciona maior eficiência do uso de radiação fotossinteticamente ativa em canola.

A ausência de drenos superficiais diminui a eficiência do uso de radiação fotossinteticamente ativa em canola em terras baixas com elevação do lençol freático.

3.5 REFERÊNCIAS

ALFAZL, F. A. Determination of phenological response of spring canola (*Brassica napus* L.) genotypes to sowing date, temperature and photoperiod. **Seed and Plant Production Journal**, v. 26, n. 1, p. 25-41, 2010.

ANDERSEN, M. N.; HEIDMANN, T.; PLAUBORG, F. The effects of drought and nitrogen on light interception, growth and yield of winter oilseed rape. **Soil and Plant Science**, v. 46, n. 1, p. 55-67, 2009.

ANGADI, S. et al. Response of three Brassica species to high temperature stress during reproductive growth. **Canadian Journal of Plant Sciences**, v. 80, n. 1, p. 99-152, 2000.

BARRERA-ROJAS, C. H. et al. MiR156-targeted SPL10 controls Arabidopsis root meristem activity and root-derived de novo shoot regeneration via cytokinin responses. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 3, p. 934-950, jan., 2020.

BATTISTI, R. et al. Dinâmica floral e abortamento de flores em híbridos de canola e mostarda castanha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 2, p. 174-181, 2013.

BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J.I. **As Plantas e o Clima** - Princípios e aplicações. Guaíba: Agrolivros, 2017. 351p.

BETEMPS, C. **Técnica é capaz de aumentar produtividade de grãos em 26 sacas por hectare no Sul**. EMBRAPA. Brasília, 15 jun. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/62880364/tecnica-e-capaz-de-aumentar-produtividade-de-graos-em-26-sacas-por-hectare-no-p_auth=GUmB676Y> Acesso em: 20 jun de 2021.

BIABANI, A. et al. Physiological traits, yield, and yield components relationship in winter and spring canola. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. v. 101, n. 8, p. 101-118, jun., 2021.

BORTOLUZZI, M. P. **Probabilidade de ocorrência de excesso hídrico para a cultura da soja em planossolos da região central do Rio Grande do Sul**. 2015. 88 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

BRACHTVOGEL, E. L. et al. População, arranjo de plantas uniforme e a competição intraespecífica em milho. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 6, n. 1, p. 75-83, 2012.

BRANDLER, D. **Interferência e nível de dano econômico de plantas daninhas na cultura da canola**. 2019. 77 p. (Dissertação de mestrado em ciência e tecnologia ambiental) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 2019.

BRUNEL-MUGUET, S. et al. Light Restriction Delays Leaf Senescence in Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L.). **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 32, n. 1, p. 506-518, fev., 2013.

BURIOL, G. A.; ESTEFANEL, V.; SWAROWSKY, A.; D'AVILA, R. F. Homogeneidade e estatísticas descritivas dos totais mensais e anuais de chuva de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.11, n. 1, p.89- 97, 2006.

BURIOL, G. A. et al. Disponibilidades hídricas do solo possíveis de ocorrerem no estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, n. 10, n. 1, p. 1-141, 1980.

CASAROLI, D. et al. Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura de soja. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**, Uruguaiana, v. 14, n. 2, p. 102-120, 2007.

CHAVARRIA, G. et al. Índice de área foliar em canola cultivada sob variações de espaçamento e de densidade de semeadura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 12, p. 2084-2089, 2011.

CHINNUSAMY, V. et al. Cold stress regulation of gene expression in plants. **Trends in Plant Science**, v. 12, n. 1, p. 444-451, 2007.

CONCENÇO, G. et al. Semeadura direta de arroz em resteva de soja cultivada no sistema sulco-camalhão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 13221-13231, mar., 2020.

DALMAGO, G. A. et al. Aclimação ao frio e dano por geada em canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 9, p. 933-943, 2010.

DALMAGO, G. A. et al. Canola. In: MONTEIRO, J. E. **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. 1. ed. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009. cap 8, p. 133-149.

DALMAGO, G. A. et al. Use of solar radiation in the improvement of spring canola (*Brassica napus* L., Brassicaceae) yield influenced by nitrogen topdressing fertilization. **Agrometeoros**, v. 26, n. 1, p. 223-237, jul., 2018.

EDWARDS, J.; HERTEL, K. **Canola growth and development**. 2011. Disponível em: <<http://www.dpi.nsw.gov.au/aboutus/resources/bookshop/canolagrowthanddevelopment>>. Acesso em: 30 mar. 2021.

FAGAN, E. B. et al. Lei de Beer e sua relação com a ecofisiologia de plantas. **Revista do Centro Universitário de Patos de Minas**, v. 4, n. 1, p. 78-97, 2013.

FAO. **Food Outlook** – Biannual Report on Global Food Markets. Roma, jun. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.4060/cb4479en>>. Acesso em: 25 jul. 2021. ISBN: 978-92-5-134334-0

FERREIRA, D. F. Sisvar: um Guia para seus procedimentos bootstrap em múltiplas comparações. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014.

FOCHESATTO, E. et al. Influência de variáveis ambientais no acúmulo de graus dia em canola. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE CANOLA, 1., 2014, Passo Fundo. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa, 2014.

FOCHESATTO, E. et al. Interceptação da radiação solar pelas estruturas produtivas de híbridos de canola de primavera. **Ciência Rural**, v. 46, n. 10, p. 1790-1796, out., 2016.

FONTOURA JUNIOR, J. A. S. da et al. Simulação de diferentes arranjos de sistemas integrados em áreas de várzea / simulation of different arrangements of integrated systems in lowland areas. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 63059-63077, ago., 2020.

FRAY, M.J. et al. Physiological assessment of apetalous flowers and erectophile pods in oilseed rape (*Brassica napus*). **Journal of Agricultural Science**, v. 127, n. 2, p. 193-200, 2009.

GARCIA, L. C. et al. Custo e lucro da produção de canola e milho nos Estados Unidos da América e Brasil. **Revista Conexão**, v. 17, n. 1, p. 1-17, 2021.

GOULART, R. Z. **Manejo de solo de várzea para cultivo de soja, milho e forrageiras hibernais na fronteira oeste gaúcha**. 2016. 82 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

GOULART, R. Z.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F. Cropping poorly-drained lowland soils: alternative to rice monoculture, their challenges and management strategies. **Agricultural Systems**, v. 177, v. 1, p. 1-15, 2020.

HABIBZADEH, F. et al. Alleviation of waterlogging damage by foliar application of nitrogen compounds and tricyclazole in canola. **Australian Journal of Crop Science**, v. 7, n. 3, p. 401-406, 2013.

HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; STRECK, N. A. O clima de Santa Maria. **Ciência e Ambiente**, v. 38, n. 1, p. 43-58, 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas do Brasil**. Brasília, 2021. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais>>. Acesso em: 25 jul. 2021.

IRIARTE, L. B.; VALETTI, O. E. **Cultivo de Colza**. 1. ed. Buenos Aires, AG: Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária – INTA, 2008. 156 p.

KOVALESKI, S. **Efeitos da geada em canola (*Brassica napus* L.) em função da distribuição da palha na superfície do solo**. 2015. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

KREUZWIESER, J.; PAPADOPOULOU, E.; RENNENBERG, H. Interaction of flooding with carbon metabolism of forest trees. **Plant Biology**, v. 6, n. 1, p. 299-306, 2004.

KRÜGER, C. A. M. B. et al. Arranjo de plantas na expressão dos componentes de produtividade de grãos de canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 1, p. 1448-1453, 2011a.

KRÜGER et al. Herdabilidade e correlação fenotípica de caracteres relacionados à produtividade de grãos e à morfologia da canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 12, p. 1625-1632, dez., 2011b.

KRÜGER, C. A. M. B. et al. Relações de variáveis ambientais e subperíodos na produtividade e teor de óleo em canola. **Ciência Rural**, v. 44, n. 9, p. 1671-1677, set., 2014.

KRÜGER, C. A. M. B. Interceptação da radiação fotossinteticamente ativa por canola em distintas condições de cultivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 20.; SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICAÇÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 5., 2017, Juazeiro/CE. **Anais...** Juazeiro/CE: Embrapa Semiárido, 201., p. 1-5.

KUAI, J. et al. The yield of mechanically harvested rapeseed (*Brassica napus* L.) can be increased by optimum plant density and row spacing. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 1871-1883, 2015.

KUNZ, J. H. et al. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 11, p. 1511-1520, 2007.

LAKE, L.; SADRAS, V. Associations between yield, intercepted radiation and radiation-use efficiency in chickpea. **Crop & Pasture Science**, v. 68, p. 140-147, 2017.

LIU, M. et al. Properties of root water transport in canola (*Brassica napus*) subjected to waterlogging at the seedling, flowering and podding growth stages. **Plant Soil**, v. 454, n. 1, p. 431-445, 2020.

LUZ, G. L. et al. Temperatura base inferior e ciclo de híbridos de canola. **Ciência Rural**, v. 42, n. 9, p. 1549-1555, set., 2012.

LUZ, G. L. **Exigência térmica e produtividade de canola em diferentes épocas de semeadura em Santa Maria – RS**. 2011. 68 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

MODOLO, A. J. et al. Rendimento de soja em função do arranjo de plantas. **Brazilian Journal of Agriculture**, v. 91, n. 3, p. 216-225, 2016.

MOGENSEN, J; KRUSE, T. A.; BORGLUM, A. D. Atribuição do gene troponina cardíaca humana I (*TNNI3*) ao cromossomo 19q13.4 por mapeamento híbrido de radiação. **O Citogenet Genet celular**, v. 79, n. 1, p. 272-273, 1997.

MONSI M; SAEKI T. Über den Lichtfaktor em den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. **Jornal Japonês de Botânica**, v. 14, n. 1, p. 22-52, 1953.

MONTEITH, J. L. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 68, n. 1, p. 213-220, 1994.

MORRISON M. J. Heat stress during reproduction in summer rape. **Canadian Journal of Botany**, v. 71, n. 2, p. 303-308, fev., 1993.

MÜLLER, A. G.; BERGAMASCHI, H. Eficiências de interceptação, absorção e uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas e verificação do modelo energético de estimativa da massa seca. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 1, p. 27-33, 2005.

NIED, A. H. **Parâmetros bioclimáticos e respostas da canola ao ambiente físico**. 2013. 136 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

PANDOLFO, C. **Parâmetros básicos para uso na modelagem do rendimento de matéria seca de alfafa (*Medicago sativa* L.)**. 1995. 128 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

PERBONI, A. T. et al. Baixas temperaturas sobre a fluorescência da clorofila a em plantas de diferentes híbridos de canola. **Ciência Rural**, v. 45, n. 2, p. 215-222, set-out., 2014.

PERUZATTO, J. M. Z. et al. The Impact of Oxytocin Gene Knockout on Sexual Behavior and Gene Expression Related to Neuroendocrine Systems in the Brain of Female Mice. **Cellular and Molecular Neurobiology**, v. 37, n. 1, p. 803-815, 2017.

PILAU, F. G.; ANGELOCCI, L. R. Área da Folha e Interceptação de Radiação Solar por Orange Tree Top. **Bragantia**, v. 74, n. 1, p. 476-482, 2015.

PLOSCHUK, R. A. et al. Waterlogging of winter crops at early stages: impacts on leaf physiology, growth and yield. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, n. 1863, p. 1-25, dez., 2018.

RADIN, B. et al. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 9, p. 1017-1023, 2003.

ROBERTSON, J. B. et al. A luz visível altera os ritmos metabólicos da levedura inibindo a respiração. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 52, p.21130-21135, 2013.

ROCHA, L. da. **Crescimento, desenvolvimento e produtividade de canola em solo com excesso hídrico natural**. 2018. 81 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

RONDANINI, D. P. et al. Vegetative plasticity and floral branching compensate low plant density in modern spring rapeseed. **Field Crops Research**, v. 210, n. 1, p. 104-113, ago., 2017.

ROSA, H. T et al. Métodos de soma térmica e datas de semeadura na determinação de filocrono de cultivares de trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.11, p.1374-1382, nov. 2009

SANTOS, C. J. O. G. et al. Efeito da desfolha na altura de plantas e produtividade de grãos de canola (*Brassica napus* L.). **Ciência Agrícola**, v. 18, n. 1, p. 11-19, 2020.

SANTOS, H.G. dos et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5.ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SARTORI, G. M. S. et al. Soybean Tillage Systems and Physical Changes in Surface Layers of Two Albaqualf Soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 40, n. 1, p. 1-15, 2016.

SCHÖFFEL, E. R.; VOLPE, C. A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela soja para a produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 241-249, 2001.

SILVEIRA, H. R. de O. et al. Efeitos do excesso de água no crescimento de mudas de café (*Coffea arabica* L.). **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, n. 2, p. 211-218, 2014.

SINGH, J.; SINGH, S. P.; KINGRA, P. K. Influence of sowing time and planting geometry on yield and radiation use efficiency of various rapeseed-mustard cultivars. **Journal of Agrometeorology**, v. 20, n. 3, p. 246-248, set., 2018.

SON, K. H.; IDE, M.; GOTO, E. Características de crescimento e fitoquímicos da canola (*Brassica napus*) cultivada sob radiação UV e baixa temperatura da zona radicular em um ambiente controlado. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 61, n. 1, p. 267-277, 2020.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017. 888 p.

TARTAGLIA, F. de L. **Respostas agronômicas e ecofisiológicas da cultura da canola ao excesso hídrico**. 2016. 97 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

TARTAGLIA, F. de L. et al. Water excess in different phenological stages of canola cultivars. **African Journal of Agricultural Research**, v. 13, n. 45, p. 2563-2569. 2018.

TARTAGLIA, F. de L. et al. Non-destructive models for leaf area determination in canola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 551-556, 2016.

TAVARES, A. C. S. et al. Efeito da inundação do solo nos índices fisiológicos da cana-de-açúcar. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 1, p. 229-235, 2018.

TESFAMARIAM, E. H.; ANNANDALE, J. G.; STEYN, J. M. Estresse hídrico efeitos sobre o crescimento e rendimento da canola de inverno. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 102, n. 2, p. 658-666, 2010.

THIMIJJAN, R. W.; HEINS, R. D. Unidades de Medida Fotométricas, Radiométricas e De Luz Quântica: Uma Revisão dos Procedimentos para Interconversão. **Hortscience**, v. 18, n. 1, p. 818-882, 1983.

THOMAS, P. **Canola Growers Manual**. Winnipeg, MB, Canadá, 2003. Disponível em: <<https://canolagrowers.com/resource/canola-growers-manual/>>. Acesso em: 21 mai. 2021.

TOMM, G. O. **Indicativos tecnológicos para produção de canola no Rio Grande do Sul**. Embrapa Trigo: Passo Fundo, 2007. 68 p. (Embrapa Trigo. Sistemas de produção, 4). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/canola/p_sp03_2007.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2021.

TOMM, G. O. et al. **Tecnologia para produção de canola no Rio Grande do Sul**. Documentos online, n. 113. Embrapa Trigo. p. 1-39, dez., 2009. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do113.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2021.

TOMM, G.O. et al. **Efeito de épocas de semeadura sobre o desempenho de genótipos de canola de ciclo precoce e médio, em Maringá, Paraná**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2010. 13 p. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/bp/p_bp75.htm>. Acesso em: 12 jul. 2021.

TOMM, G.O. et al. Cultivo de Canola. In: TOMM, G.O. **Sistema de Produção**, 3. ed. Passo Fundo, RS: Embrapa Trigo, 2014.

VALE, F. X. R. et al. Quant - A software to quantify plant disease severity. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON PLANT DISEASE EPIDEMIOLOGY; The International Society of Plant Pathology, Ouro Preto, Brasil, **Anais ...** 2001, v. 8, p. 160.

WALKER, E.R. et al. Plant population and row-spacing effects on maturity group III soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 3, p. 821-826, 2010.

XU, M. et al. The effect of waterlogging on yield and seed quality at the early flowering stage in *Brassica napus* L. **Field Crops Research**, v. 180, p. 238-245, 2015.

ZHANG, H.; FLOTTMANN, S. Seed yield of canola (*Brassica napus* L.) is determined primarily by biomass in a high-yielding environment. **Crop and Pasture Science**, v. 67, n. 4, p. 369-380, jun., 2016.

ZHOU, W.; LIN, X. Effects of waterlogging at different growth stages on physiological characteristics and seed yield of winter rape (*Brassica napus* L.). **Field Crops Research**, v. 44, n. 2, p. 103-110, dez., 1995.

ZHOU, W. et al. Plant waterlogging/flooding stress responses: From seed germination to maturation. **Plant Physiol Biochem**, v. 148, n. 1, p. 228-236, mar. 2020.

ZHU, J. K. Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants. **Cell**, v. 167, n. 2, p. 313-324, 2016.

ZOU, X. et al. A comparison of screening methods to identify waterlogging in the field in *Brassica napus* L. during plant ontogeny. **Plos One**, v. 2014.

4 CAPÍTULO II – RESPOSTA DA CANOLA A MODIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CULTIVO EM AMBIENTE SUCEPTÍVEL A EXCESSO HÍDRICO

RESPONSE OF CANOLA TO CHANGES IN THE CULTIVATION CONDITIONS IN A WATERLOGGING-SUSCEPTIBLE ENVIRONMENT

RESUMO

O excesso hídrico no solo interfere diretamente na capacidade produtiva das culturas, em resposta às alterações morfofisiológicas condicionadas nas plantas. O objetivo do presente trabalho foi analisar e quantificar o efeito do excesso hídrico na capacidade produtiva e de crescimento da cultura da canola quando submetida à drenagem superficial do solo com elevação do lençol freático e variação do espaçamento entre fileiras de semeadura na depressão central do Rio Grande do Sul. O delineamento utilizado foi de blocos casualizados com 4 repetições, em esquema bifatorial. O fator drenagem superficial do solo foi composto da presença e ausência de drenos superficiais de 0,25 m de profundidade, e o fator espaçamento entre linhas de semeadura nos níveis 0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m, todos na densidade de 40 plantas m⁻². Foram realizados dois experimentos, sendo um em 2018 e outro em 2019. Os tratamentos culturais e manejo fitossanitário seguiram as recomendações para a cultura. Foram avaliados caracteres de crescimento, componentes de rendimento e produtividade final de grãos. As condições edafoclimáticas distintas em 2018 e 2019 interferiram de maneira significativa na resposta da canola em ambientes sob excesso hídrico. O aumento da ramificação das plantas de canola está diretamente relacionado ao excesso hídrico e afeta negativamente a produtividade. A utilização de drenos impactou positivamente o número de síliquas por planta, grãos por síliqua, massa de mil grãos e produtividade de grãos. O menor espaçamento (0,17 m) resultou em maior número de grãos por síliqua. A maior produtividade de grãos foi obtida nos espaçamentos entre linhas de semeadura de 0,41 m em 2018 e de 0,17 m em 2019. Infere-se que a utilização de espaçamentos intermediários, entre 0,41 e 0,48 m em condições de excesso hídrico sob drenagem superficial assegura a obtenção de produtividade de grãos de canola mais satisfatória em terras baixas.

Palavras-chave: Lençol freático. Terras baixas. Produtividade de grãos. Plasticidade fenotípica. Drenos.

ABSTRACT

Waterlogging interferes directly with the production capacity of agricultural crops in response to morphophysiological changes caused to plants. The present study aimed to analyze and quantify the effect of waterlogging on the production capacity and growth of canola subjected to soil surface drainage with water table rise and row spacing variation in the Central Depression region of Rio Grande do Sul. The experimental design was in randomized blocks with four replications and a two-factorial arrangement. The surface drainage factor consisted of the presence and absence of surface drains 0.25 m deep, and the row spacing factor consisted of the levels of 0.17, 0.34, 0.51, and 0.68 m at a density of 40 plants m⁻². Two experiments

were conducted, one in 2018 and another in 2019. The crop management and phytosanitary practices followed the recommendations for the crop, and the growth traits, yield components, and final grain yield were evaluated. The different edaphoclimatic conditions in 2018 and 2019 significantly interfered with the response of canola grown under waterlogging. The increase in branching is directly related to waterlogging, negatively affecting the yield. Drainage positively impacted the number of siliques per plant, grains per silique, thousand-grain mass, and grain yield. The smallest spacing (0.17 m) resulted in the highest number of grains per silique. The highest grain yield was obtained with the row spacings of 0.41 m in 2018 and 0.17 m in 2019. The results suggest that the use of intermediate spacings, between 0.41 and 0.48 m and under waterlogging conditions subjected to surface soil drainage ensures satisfactory grain yields in lowlands.

Keywords: Water table. Lowlands. Grain yield. Phenotypic plasticity. Drains.

4.1 INTRODUÇÃO

A inserção de novas culturas com grande capacidade produtiva e de rentabilidade nos sistemas produtivos vem impulsionando a canola (*Brassica napus*) no âmbito de grãos produzidos. A terceira oleaginosa mais cultivada mundialmente, em 2019 contribui com 12% da produção de grãos, totalizando 70,5 milhões de toneladas produzidos mundialmente (FAO, 2021). A ótima qualidade nutricional e a versatilidade de utilização dos grãos, que vai desde a alimentação humana e animal, indústria farmacêutica e até a produção de biocombustíveis, são aspectos que valorizaram o preço do grão no mercado e impactam no aumento do cultivo de canola (GULARTE; MACEDO; PANOZZO, 2020).

Apesar da canola ser adaptada a regiões de clima temperado, no sul do Brasil seu cultivo ainda pode ser mais expressivo, pois concentra-se somente nas proximidades das indústrias esmagadoras. A utilização da cultura em áreas ociosas no período de outono/inverno pode ser uma alternativa importante na difusão da cultura, associada principalmente aos benefícios da rotação de culturas, quebra do ciclo de doenças e pragas, melhor controle de plantas daninhas, otimização da utilização da infraestrutura e maior retorno financeiro ao produtor (ROCHA, 2018; TOMM, 2007).

No Rio Grande do Sul, as áreas cultivadas com arroz são áreas potenciais para o cultivo dessa oleaginosa, pois apresentam exploração agrícola apenas no período de primavera e verão. No período de entressafra, outono e inverno, estas áreas permanecem sob pousio (FONTOURA JÚNIOR et al., 2020). Porém, os solos

presentes nestes ambientes de cultivo apresentam limitações no seu processo de drenagem natural, que associadas ao relevo menos favorável ao escoamento superficial, menor demanda atmosférica por vapor de água e chuvas mais frequentes no outono/inverno, fazem com que o excesso hídrico do solo se torne mais frequente e prolongado (BORTOLUZZI, 2015; GOULART; REICHERT; RODRIGUES, 2020). Nessas áreas, o cultivo de soja e milho tem sido efetuado com sucesso na primavera/verão mediante o uso de drenagem superficial (BETEMPS, 2021; GOULART, 2016), o que indica que, com técnica similar possa ser possível realizar também cultivos de inverno.

O excesso hídrico do solo é considerado um entrave no cultivo de plantas não adaptadas ou com ausência de mecanismos de tolerância (BORTOLUZZI, 2019; LIU et al., 2020; MUSTROPH, 2018). A limitação e/ou supressão do espaço poroso com ar por água nestes ambientes, prejudica as trocas gasosas para o sistema radicular das plantas, especialmente do oxigênio e CO₂ (XU et al., 1992). Para níveis críticos menores de 10% de espaço aéreo no solo e a taxa de difusão de O₂ menor que 0,2 µg cm⁻² min⁻¹, o sistema radicular tem seu crescimento inibido e o seu funcionamento começa a ser prejudicado (SILVA; PARFITT, 2004; XU et al., 1992).

O comprometimento do fluxo gasoso no solo por excesso de umidade afeta negativamente os cultivos de inverno em seu metabolismo aeróbico no sistema radicular, níveis fotossintéticos, condutância estomática, além da absorção de nutrientes (PLOSCHUK et al., 2020). Na ausência de alterações morfoanatômicas como observado na cultura do arroz, o excesso hídrico pode condicionar a mortalidade de raízes (PLOSCHUK et al., 2020; ZOU et al., 2014), a senescência foliar (GAMALERO; GLICK, 2012; HABIBZADEH et al., 2013; ZHU, 2016) e a redução de crescimento em *Brassicas* (LIU et al., 2020). Em condições de encharcamento do solo, os tecidos vegetais podem reduzir sua taxa de assimilação de fotoassimilados entre 65 e 97% (GIBBS; GREENWAY, 2003). A menor produção de energia nos vegetais reflete diretamente na redução da capacidade produtiva das plantas, podendo inviabilizar seus cultivos.

A canola é uma cultura considerada suscetível ao cultivo sob excesso hídrico do solo segundo muitos autores (LI et al., 2014; PLOSCHUK et al., 2020; TARTAGLIA et al., 2018; XU et al., 2015; ZOU et al., 2014), devendo ser evitados estes ambientes (TOMM et al., 2009). Porém, estudos realizados em distintos países, principalmente no continente Asiático, têm demonstrado que o cultivo de

canola em ambientes sob excesso hídrico é possível mediante a utilização de cultivares mais tolerantes (GUO et al., 2020; LIU et al., 2020; ZAMAN et al., 2019; ZOU et al., 2013; ZOU et al., 2015), bem como manejo adequado para esses solos (PASHAKOLAEI; SHAHNAZARI; TALUKOLAEI, 2017; ROCHA, 2018) e mais consistentes da cultura (HABIBZADEH et al., 2013). No Brasil, existem ainda poucos estudos com a cultura da canola em ambientes com excesso hídrico do solo, onde basicamente relatam o uso de drenos em parcelas experimentais pequenas e cultivo em microcamalhão (FERREIRA et al., 2014; ROCHA, 2018; TARTAGLIA, 2016).

A distribuição espacial de plantas também apresenta influência sobre a capacidade de crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas. A alteração do espaçamento entre linhas e/ou entre plantas interfere diretamente na competição intraespecífica e interespecífica por elementos essenciais como radiação solar (KRÜGER et al., 2017; PERUZATTO, 2017), água, nutrientes e espaço físico (KRÜGER, 2011). Vários estudos já foram realizados com modificações espaciais no estande do dossel (BANDEIRA; CHAVARRIA; TOMM, 2013; KUAI et al., 2015; KRÜGER et al., 2011a; KRÜGER et al., 2017; MOUSAVI; SAM-DALIRI; MOBASSER, 2011; SHAHIN, VALIOLLAH, 2009). Porém, faltam informações para elucidar seu comportamento sob efeito de condições adversas como em excesso hídrico no solo.

Neste sentido, a utilização da drenagem superficial do solo, tal como realizado para soja e milho na primavera e verão (BETEMPS, 2021; EMYGDIO; ROSA; OLIVEIRA, 2017; MELO et al., 2021), pode ser uma alternativa para o cultivo de canola em ambientes que apresentem problemas com drenagem superficial e elevação do lençol freático do solo em períodos intermitentes durante o outono e inverno. Aliado a isso, a alteração do arranjo espacial das plantas pode criar condições mais favoráveis ao crescimento e desenvolvimento de canola, reduzindo as perdas associadas a excesso de umidade no solo e no ar.

Sendo possível o cultivo de espécies sensíveis ao estresse por excesso hídrico na primavera e verão, mediante investimento com drenagem superficial, no outono e inverno isso pode também ser verdadeiro. Isso reduzirá a ociosidade das terras baixas no outono e inverno e permitirá o aproveitamento da estrutura de drenagem superficial efetuada para culturas primavera e verão, quando da adoção da semeadura direta. Contudo, nas condições subtropicais do Brasil ainda são poucas as informações na literatura a respeito do efeito do excesso hídrico no solo

do cultivo de canola e como a alteração no arranjo de plantas nestes ambientes pode impactar a capacidade produtiva da cultura. Com isso, objetivou-se avaliar os componentes morfológicos e produtivos da canola sob a variação do espaçamento entre linhas e a condição de drenagem superficial.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido na depressão central do Rio Grande do Sul em ambiente de terras baixas, localizadas no departamento de Fitotecnia, do Centro de Ciências Rurais, da Universidade Federal de Santa Maria (29° 43' 23" S; 53° 43' 15" O; 95 m), nos anos de 2018 e 2019. O clima da região é do tipo Cfa, subtropical úmido com temperatura média normal do mês mais quente superior a 22,0°C (janeiro) e mais frio (junho) em 12,9°C (HELDWEIN; BURIOL; STRECK, 2009). A precipitação normal é regularmente distribuída em todos os meses do ano, com média anual de 1712,4 mm em 92 anos (BURIOL et al., 2006) e com alta probabilidade de ocorrência de grande e frequente excedente hídrico entre os meses de maio e setembro, associados à baixa demanda evapotranspiratória (BURIOL et al., 1980).

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados em faixas e parcelas subdivididas com 4 repetições em esquema fatorial 2x4. Nas faixas foram alocados os níveis do fator drenagem superficial do solo (com e sem presença de drenos superficiais) e nas parcelas subdivididas alocou-se os níveis do fator espaçamento entre fileiras de semeadura (0,17; 0,34; 0,51 e 0,68 m), com quatro repetições para cada tratamento, mantendo-se a densidade de semeadura visando garantir o estabelecimento de 40 plantas por m² em todos os tratamentos. Os drenos superficiais do solo foram constituídos de estruturas construídas com auxílio de equipamentos apropriados para a abertura de um sulco de 0,25 m de profundidade e 0,25 m de largura ao redor das unidades experimentais. As unidades experimentais foram constituídas de parcelas com dimensões de 10x10 m com bordaduras de 1,5 m.

No processo de semeadura da canola utilizou-se a cultivar Diamond, em preferência ao ciclo precoce, com alto teor de óleo, resistência poligênica a doenças e sua vasta utilização em cultivos no Rio Grande do Sul. A implantação da cultura foi realizada através de cultivo convencional, adotado pela predominância de uso nos cultivos em terras baixas, além da deposição das sementes em pequena

profundidade no solo, no máximo 0,02 m. A direção das linhas seguiu orientação norte-sul. Em ambas as safras, realizou-se a semeadura em datas próximas ao início de junho, contemplando as datas de 29 de maio de 2018 e 06 de junho de 2019.

A correção do solo, adubação de base e de cobertura, foram realizadas em função da análise de solo coletada previamente a cada safra (Apêndice A) e estimadas para uma expectativa de rendimento de 3 Mg ha⁻¹, conforme indicações do manual de adubação e calagem para a cultura da canola no RS e SC (SBCS, 2016). Na adubação de cobertura foi utilizado nitrogênio na forma amídica e amoniacal, através da ureia e sulfato de amônio, ambos aplicados em meia dose na fase de roseta (V4) e no início do florescimento (IF). O sulfato de amônio foi empregado com a finalidade de suplementar a adubação com enxofre para as plantas de canola.

Os tratos culturais e manejos fitossanitários para a cultura da canola foram realizados conforme sua necessidade e foram estabelecidos conforme as indicações de cultivo de canola (TOMM, 2007). Dentre as principais plantas infestantes e pragas destacam-se a presença de gorga (*Spergula arvensis*), azevém (*Lolium multiflorum*), podridão-branca-da-haste (*Sclerotinia sclerotiorum* Lib. de Bary), mancha-de-alternária (*Alternaria* spp.), vaquinha verde (*Diabrotica speciosa*) e Traça das crucíferas (*Plutella xylostella*).

Realizou-se o desbaste das plantas em excesso quando estas emitiram a primeira folha verdadeira (V1). Com a variação do espaçamento entre as linhas de semeadura, no objetivo de atingir o estande final homogêneo em todas as unidades experimentais em 40 plantas m⁻², o espaçamento entre plantas na linha de semeadura foi ajustado para 0,148, 0,074, 0,049 e 0,036 m, respectivamente para os espaçamentos entre linhas de semeadura de 0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m.

As avaliações constaram da determinação da altura de planta (AP), número de ramos por planta (NRS: número de ramos secundários; NRT: número de ramos terciários; NRQ: número de ramos quaternários, NTR: número total de ramos por planta), densidade final de plantas (DP), número de síliquas por planta (NSP), número de grãos por síliqua (NGS), massa de mil grãos (MMG) e produtividade de grãos (PG) nas safras 2018 e 2019.

A altura final de planta (AP) foi determinada através da medição aleatória de 10 plantas dentro da área útil de cada unidade experimental quando as plantas de

canola atingiram o estágio de maturação fisiológica. Para a medição utilizou-se uma régua graduada, medindo-se a distância entre o colo da planta e a região apical do caule principal. Na mesma ocasião também se realizou a mensuração da densidade final de plantas (DP). Para mensuração da DP foi realizada a contagem das plantas presentes em 4 metros lineares demarcados aleatoriamente dentro de cada unidade experimental.

Na determinação do número de ramos (Anexo B), procedeu-se a coleta aleatória de seis plantas por parcela, realizando-se a contagem de ramos oriundos a partir do ramo principal (número de ramos secundários, NRS), ramos originários de ramos secundários (número de ramos terciários, NRT) e ramos oriundos de ramos terciários (número de ramos quaternários, NRQ), conforme ilustração no Anexo B. O número total de ramos foi obtido pela soma de NRS, NRT e NQR com a haste principal.

Nas mesmas plantas coletadas para a mensuração do número de ramos foi realizada a determinação do número de síliquas por planta (NSP), número de grãos por síliqua (NGS) e massa de mil grãos (MMG). O NSP foi obtido pela contagem de todas as síliquas férteis e inférteis presentes nos ramos, calculando-se então a média por planta. Para a determinação do NGS, foram seccionadas 20 síliquas aleatoriamente nas plantas nos distintos ramos, onde se contaram todos os grãos viáveis presentes. A MMG foi obtida através da debulha dos grãos das plantas coletadas, e por ocasião da homogeneização dos grãos, realizou-se a contagem de 3 subamostras de 100 grãos e posteriormente converteu-se a média para a massa de mil grãos.

A produtividade de grãos (PG) foi avaliada quando as plantas atingiram a maturação fisiológica, ou seja, 50% dos grãos apresentavam a coloração marrom. Foram coletadas as plantas em uma área de 4,08 m² localizada ao centro da área útil das unidades experimentais. Nos distintos espaçamentos, essa área colhida compreendeu a 12, 6, 4 e 3 linhas com extensão de 2 metros lineares, respectivamente nos espaçamentos de 0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m.

Para a colheita realizou-se o corte das plantas rente ao solo, acondicionando-as em sacos de tecido não tecido, que foram transferidos para ambiente arejado e seco, para sua secagem natural. Após estabilização da massa, as amostras foram debulhadas de forma manual, sendo os grãos separados do restante da MS da parte aérea, para serem submetidos ao processo de secagem em estufa com temperatura

controlada a 60°C até uniformização da umidade restante nos grãos. Após a pesagem das amostras, a produtividade foi corrigida para umidade padrão de 8%, utilizada para culturas oleaginosas.

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade dos erros e homogeneidade das variâncias dos tratamentos. Na análise de variância, os dados quantitativos quando significativos pelo teste F, foram submetidos à análise de regressão e para os dados qualitativos procedeu-se a comparação de médias pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro, utilizando o programa SISVAR (FERREIRA, 2014).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

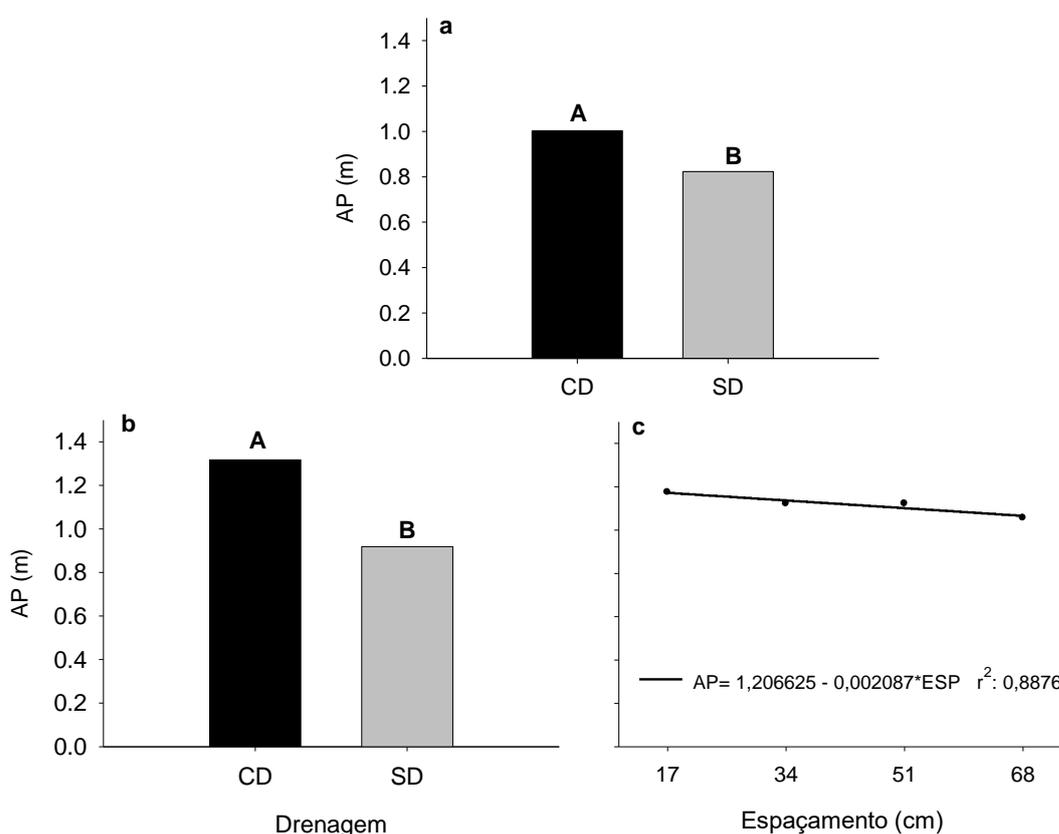
As variáveis fenométricas, componentes de rendimento e produtividade de grãos de canola sofreram efeito significativo dos fatores estudados. A inserção de sulcos superficiais nos ambientes de cultivo com presença de elevação temporária do lençol freático ou má drenagem superficial e/ou subsuperficial apresentou significância. Da mesma forma, a modificação do espaçamento entre fileiras de plantas se mostrou importante por influenciar na competição intraespecífica, dado o seu arranjo espacial (Apêndice E).

A altura de plantas de canola (AP) apenas apresentou efeito significativo para os fatores isolados, sem interação. O fator drenagem superficial do solo foi significativo em 2018 e 2019 e o espaçamento entre linhas somente em 2019 (Figura 12). Na ausência de drenagem as plantas de canola atingiram a altura de 0,82 m e 0,92 m em 2018 (Figura 12a) e 2019 (Figura 12b), respectivamente. Com a inserção de drenos superficiais no solo, a altura de plantas aumentou em 22% e 43% em 2018 e 2019, respectivamente, sendo uma indicação de aumento de restrição ao crescimento da haste principal em solo sem drenagem superficial.

Na comparação dos anos, a maior intensidade do excesso hídrico constatado em 2018 (Figura 2a), associada a maior precipitação pluviométrica, contribuiu para uma redução maior na altura das plantas de canola, sendo que em SD observou-se maior efeito na redução do AP. A redução da camada aerada do solo, condicionada pela elevação do lençol freático, modula alterações bioquímicas e fisiológicas nas plantas que tem impacto direto na morfologia vegetal (LIU et al., 2020; PLOCHUK et al., 2020). A deficiência de oxigênio e o baixo potencial redox do solo em ambientes alagados condicionam, além da limitação da atividade do sistema

radicular (KREUZWIESER; RENNENBERG, 2014; MEDRI et al., 2012), a senescência foliar em decorrência do maior acúmulo de etileno (AHMED et al., 2013; SANTOS et al., 2020). Com a redução do IAF nas plantas, a capacidade de síntese de fotoassimilados é reduzida, resultando em menor energia a ser despendida no processo de crescimento. Em decorrência disso, há limitação da disponibilidade de nutrientes no solo a serem absorvidos pelas plantas, especialmente o fósforo, elemento essencial na capacidade energética da planta (GURGEL et al., 2020).

Figura 12 – Altura de plantas de canola (AP) submetidas ao cultivo com (CD) e sem drenagem superficial do solo (SD) em diferentes espaçamentos entre linhas de semeadura nos anos de ciclo de cultivo 2018 (a) e 2019 (b e c). Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

Trabalhos desenvolvidos a campo por Zhou et al. (2014) e Rocha (2018), sob presença de excesso hídrico, mostraram reduções na altura de plantas de 50 até 57%, respectivamente. Em ambiente controlado, Rossi et al. (2015) também encontraram resultados similares para redução da AP, sendo que em camadas aeradas do solo menores do que 0,20 m observaram interferências no crescimento

de plantas de canola, enquanto restrições a 0,10 m comprometeram significativamente a AP. Resultados obtidos por Kadioglu (2019) corroboram neste sentido, pois em solos com a camada aerada a partir de 0,30 m as plantas não expressaram diferença significativa para AP em relação a solos bem drenados. Neste contexto, o uso de sulcos na profundidade de 0,25 m utilizados no atual trabalho pode ter condicionado uma camada do solo aerada suficiente para a canola realizar suas trocas gasosas e absorção de nutrientes em terras baixas, pelo menos as trocas mínimas.

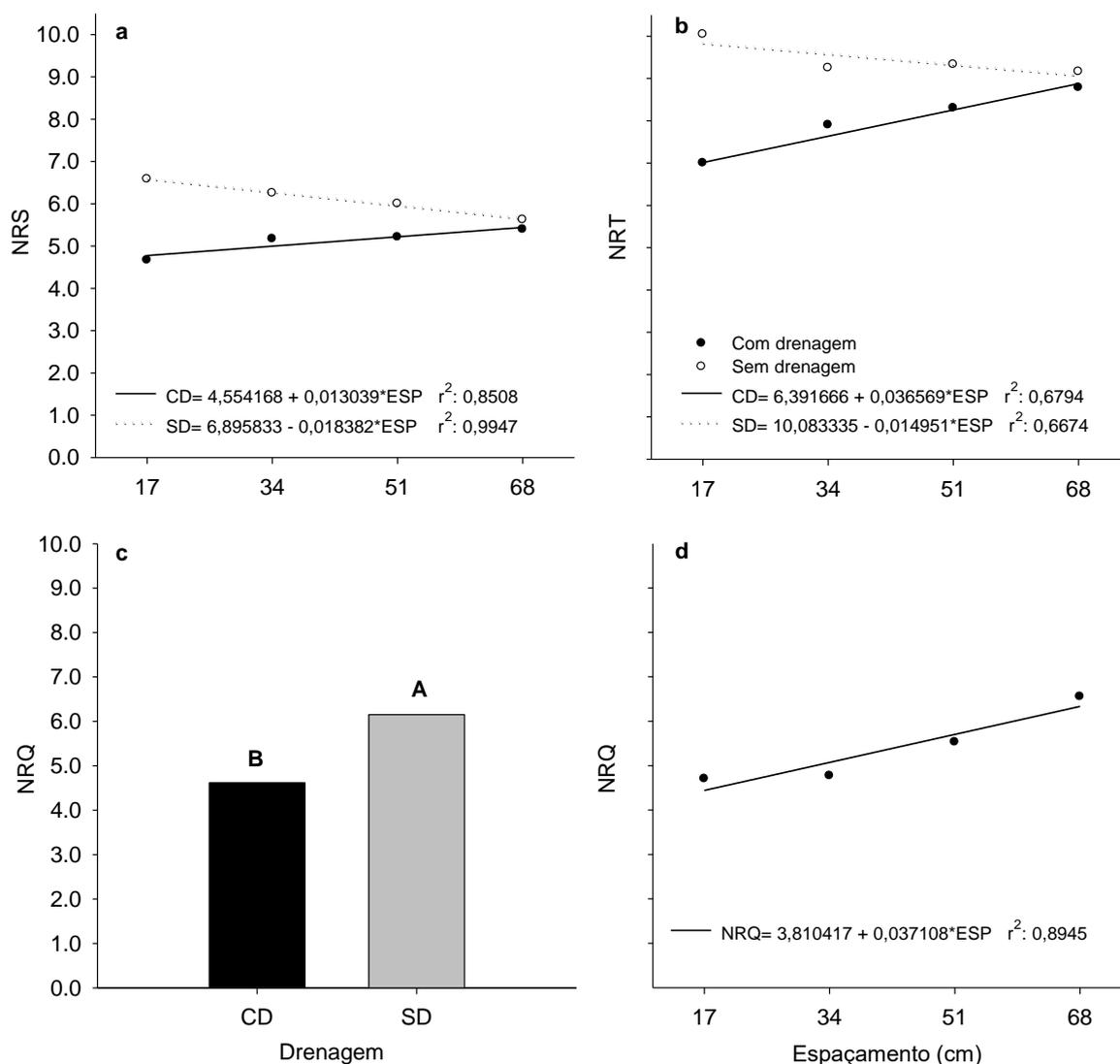
O fator espaçamento entre linhas de cultivo foi significativo apenas em 2019, onde constatou-se uma tendência de decréscimo de 0,021 m na AP para cada 0,10 m de aumento no espaçamento entre linhas de semeadura (Figura 12c). A redução do espaçamento de 0,68 m para 0,17 m resultou em um dossel de canola 11,3% mais alto, atingindo AP de 1,17 m. O aumento da AP no dossel de canola pode estar associado a menor partição de fotoassimilados para novas estruturas vegetativas e reprodutivas em ambiente drenado e redução da competição intraespecífica em espaçamentos mais reduzidos entre fileiras. Dosséis com plantas mais equidistantes conferem maior homogeneidade de ocupação do espaço, melhores condições para interceptação de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) (CHAVARRIA et al., 2011; KRUGER et al., 2017) e menor competição intraespecífica por água, RFA e nutrientes (CANOLA COUNCIL, 2021).

A dinâmica do processo de ramificação das plantas de canola também foi influenciada pela condição de drenagem superficial do solo e da alteração do espaçamento entre linhas de semeadura (Apêndice E). Em 2018 o número de ramos secundários (NRS) e terciários (NRT), ocorreu interação significativa dos fatores. Já o número de ramos quaternários (NRQ) apresentou significância apenas para os fatores isolados (Apêndice E).

O número de ramos secundários e terciários de canola em 2018 para SD apresentou redução linear de 0,18 e 0,15 ramos planta⁻¹ para cada intervalo de 0,10 m de aumento no espaçamento entre linhas, respectivamente (Figura 12a e b). Já no cultivo em solo drenado superficialmente (CD), observou-se uma resposta distinta a SD, com aumento linear de 0,13 e 0,36 ramos planta⁻¹ a cada 0,10 m de variação do espaçamento, respectivamente para NRS e NRT. Para a variação da distância entre fileiras, o espaçamento 0,17 m apresentou maior influência para a inserção de

drenos no cultivo de canola em terras baixas, obtendo-se 37,8 e 40,2% menos NRS e NRT, respectivamente, em relação ao SD.

Figura 13 – Número de ramos secundários (NRS, a), terciários (NRT, b) e quaternários (NRQ, c e d) em ambiente sem (SD) e com drenagem superficial do solo (CD) em diferentes espaçamentos entre linhas de semeadura na safra 2018 com a cultura da canola. Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

Em 2018, no subperíodo entre o final de roseta ao início do florescimento, observou-se em torno de 30 dias de elevação do lençol freático do solo a superfície (Figura 2a), impondo à canola uma condição de excesso hídrico prolongado. Neste

sentido, a emissão de novos ramos e/ou hastes pode ter sido acentuada em resposta ao efeito deletério do abortamento foliar e floral, especialmente na haste principal, principalmente na condição SD. Porém, com a intensificação da competição intraespecífica na linha, em espaçamentos maiores, aliada ao excesso hídrico mais severo em SD, a resposta da dinâmica de ramificação pode ter sido prejudicada por limitação de recursos e reservas da planta.

Em relação ao NRQ em 2018, apenas foram constatados efeitos principais isolados significativos, respectivamente, para a drenagem superficial do solo (Figura 12c) e espaçamentos entre linhas (Figura 12d). A ausência de drenagem superficial do solo interferiu substancialmente na emissão das estruturas vegetativas, aumentando a emissão do NRQ em 33,2% em relação a condição CD, atingindo um valor médio de 6,2 ramos quaternários (Figura 12c). Essa diferença, provavelmente foi ocasionada pela menor camada subsuperficial aerada do solo presente durante o florescimento da cultura em SD, principalmente após o estágio G3 até o final do florescimento, impondo às plantas de canola um efeito compensatório para perda de estruturas reprodutivas e IAF (SANTOS et al., 2020).

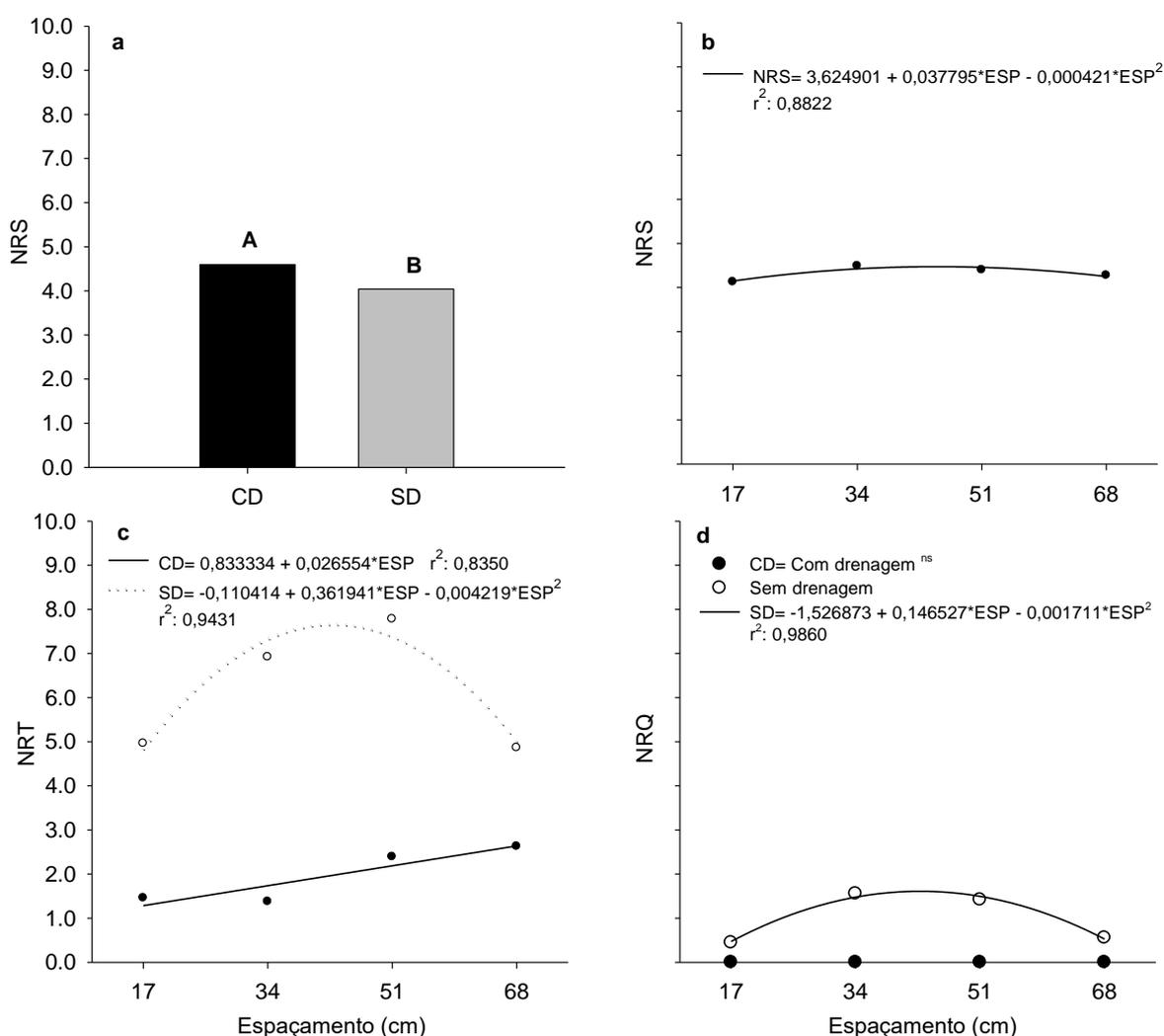
No fator espaçamento entre linhas de semeadura em 2018, observou-se um incremento linear no NRQ de 0,73 ramos a cada intervalo de 0,10 m (Figura 13d). Portanto, na modificação do espaçamento de 0,17 a 0,68 m, encontrou-se um incremento de 1,9 ramos quaternários por planta. A maior emissão de ramos laterais em espaçamentos maiores pode estar associada a plasticidade fenotípica da cultura, ou seja, maior necessidade da planta em ocupar espaços vazios para aproveitar recursos disponíveis, como RFA (KRÜGER et al., 2011B).

Em 2019 ocorreu uma distinção na resposta ao NRS, NRT e NRQ em relação a 2018. Para o NRS, apesar da resposta ser significativa para fatores principais isolados, a variação no número de ramos é muito pequena entre tratamentos, totalizando na maior diferença 0,55 ramos secundários. A utilização de drenos favoreceu um incremento de 13,8% no NRS em relação a SD (Figura 14a). Já nos níveis do fator espaçamentos entre linhas de semeadura, obteve-se maior emissão no NRS para o espaçamento 0,45 m ao se ajustar aos dados a um modelo quadrático (Figura 14b).

Na emissão dos ramos terciários, em 2019, constatou-se resposta linear positiva em CD e ajuste do modelo quadrática em SD (Figura 14c). No sistema CD o incremento no NRT foi de 82,0% no espaçamento 0,68 m em relação a 0,17 m. Para

a ausência de drenos, o espaçamento 0,43 m apresentou maior emissão de NRT com 7,65 ramos. Já no NRQ, o espaçamento 0,43 m com 1,61 ramos quaternários houve a maior emissão no modelo quadrático significativo em CD, porém para a ausência de drenos não foram observadas essas estruturas vegetativas.

Figura 14 – Número de ramos secundários (NRS), terciários (NRT) e quaternários (NRQ) em canola submetida a drenagem superficial do solo (CD) e sua ausência (SD) em diferentes espaçamentos entre linhas de semeadura na safra de 2019. Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

Esse comportamento pode estar atrelado ao subperíodo de desenvolvimento em que a planta de canola passou a ficar submetida ao excesso hídrico. Em 2018, o excesso hídrico foi mais precoce no ciclo da cultura, tendo-se observado um aumento na emissão de NRS, permanecendo por um período prolongado nessa

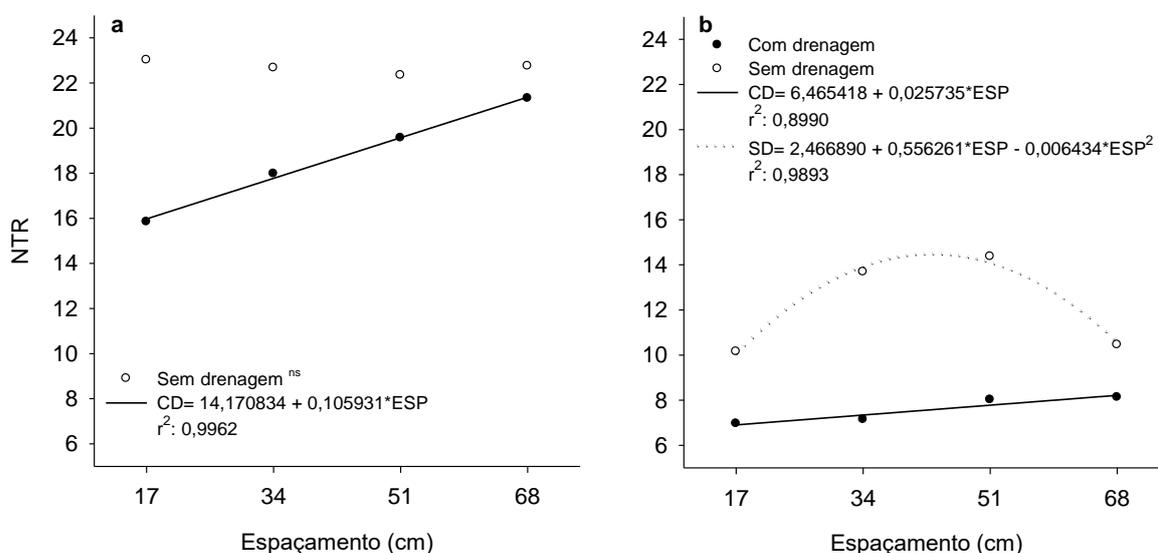
condição de estresse, o que pode ter induzido a formar um maior NRT. Já em 2019, com o excesso hídrico mais tardio, as plantas de canola apenas em SD foram estimuladas para aumento no NRT em resposta compensatória da plasticidade fenotípica. A emissão de ramos quaternários reforça esta teoria, sendo que em 2019, comparado a 2018, não foi observada em intensidade similar a elevação do lençol freático, não impondo a cultura a necessidade de emissão de novas estruturas compensatórias, exceto em CD, através do desenvolvimento favorecido, constatando-se um pequeno número destas estruturas (Figura 14d).

Em relação ao número total de ramos por planta (NTR) houve resposta linear para CD em 2018 e 2019, e em SD quadrática apenas no ano de 2019 (Figura 15). Em 2019, através do ajuste da modelo, o espaçamento 0,43 m apresentou a maior NTR em SD, no total de 14,5 ramos (Figura 15b). Este comportamento tem reflexo direto do NRT, visto que NRS e NRQ apresentaram menor variação nos distintos espaçamentos de cultivo. Krüger et al. (2011a) encontrou efeito do espaçamento entre linhas é contraditório, porém, em ambiente com diferentes condições ambientais, no qual encontrou maiores emissões do NTR em 0,60 m. Neste sentido, a redução de emissão ramos em 0,68 m em CD, pode estar associado a limitação de reservas na planta em decorrência da menor capacidade de absorção e da remobilização para diferentes drenos na planta. Na condição de anoxia do solo, o metabolismo catabólico anaeróbico é considerado um dreno importante de reservas para produção de energia química (COLMER; GREENWAY, 2005; LIU et al., 2020).

Para a utilização de drenagem superficial, nos dois anos observou-se uma menor emissão total de ramos em relação a SD com diferentes intensidades. Esta resposta nas plantas em CD, demonstra que a utilização de estruturas simples como drenos proporciona nas plantas um menor gasto energético compensatório na emissão de novas estruturas para a manutenção da capacidade produtiva da cultura, podendo utilizar as reservas mais eficazmente no processo de enchimento de grãos. Conforme Ploschuk et al. (2018), o aumento da ramificação é uma resposta condicionada pelo estresse por excesso hídrico do solo, visto que logo após a retirada do estresse, as plantas apresentam grande emissão de novas estruturas e folhas novas. Conforme Wollmer et al. (2018), a presença de excesso hídrico, principalmente no subperíodo de alongação da haste da canola, impacta significativamente na emissão de ramos laterais na planta.

Com o aumento do espaçamento em CD, o NTR também apresentou incremento, sendo representado através do ajuste linear positivo, observando-se no espaçamento 0,68 m o maior incremento no NTR nos distintos anos (Figura 15a e b). Estes resultados corroboram com Bagheri, Sharghi e Yazdani (2011) e Krüger et al. (2011a), que no aumento do espaçamento entre linhas de 0,15 a 0,45 m de 0,20 a 0,60m, observaram um incremento de 24,4 e 43,0% no NRT, totalizando 5,1 e 7,1 ramos, respectivamente. Estes dois valores se assemelham apenas aos obtidos em 2019, onde observou-se NTR de 8,1 no espaçamento 0,68 m, sendo em 2018 constatados 21,3 ramos para o mesmo arranjo espacial, embora a maior parte fossem NRT e NRQ.

Figura 15 – Número total de ramos por planta (NTR) de canola submetida ao cultivo com (CD) e sem drenagem superficial do solo (SD) em distintos espaçamentos entre linhas (ESP) para os ciclos produtivos de 2018 (a) e 2019 (b). Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

A variabilidade de resposta na modulação da emissão de ramos pode estar condicionada as condições abióticas distintas observadas nos dois anos de cultivo (Apêndice G). Em 2018, as condições edafoclimáticas foram mais adversas ao cultivo de canola do que 2019, com períodos mais prolongados sob influência de excesso hídrico do solo e de redução da disponibilidade de radiação solar, principalmente durante o subperíodo de alongação da haste e início do florescimento. Em anoxia, com a abscisão foliar condicionada pelo aumento da

concentração de etileno (AHMED et al., 2013; LORETI; VEEN; PERATA, 2016; SILVEIRA et al., 2014), ocorre a redução da dominância apical das plantas em resposta a diminuição da produção de auxinas (BATISTA-SILVA et al., 2019). Neste sentido, ocorre uma diminuição do efeito regulatório sobre a ação das citocininas, responsáveis pela expansão celular no processo de ramificação lateral (BARRERA-ROJAS et al., 2020). Além disso, através da plasticidade fenotípica, sob espaçamentos maiores entre fileiras, a planta de canola tende a emitir mais ramos para ocupar o espaço físico e potencializar a interceptação de RFA (DALMAGO et al., 2015; KRÜGER et al., 2011a; KRÜGER et al., 2017).

Os componentes de rendimento da cultura da canola foram influenciados pela condição do fator drenagem superficial do solo e modificação do espaçamento entre linhas de semeadura. Na densidade final de plantas (DP), observou-se interação significativa com efeito linear negativo para o aumento do espaçamento entre linhas de semeadura nos dois anos (Figura 16). Em 2018, para a modificação do arranjo espacial de plantas de 0,17 m para 0,68 m no espaçamento, ocorreu uma redução na DP de 40,8 e 43,7%, em CD e SD respectivamente (Figura 16a). Isso representa uma redução de uma planta de canola no estande final no momento da colheita a cada 0,05 m em CD e 0,03 m em SD.

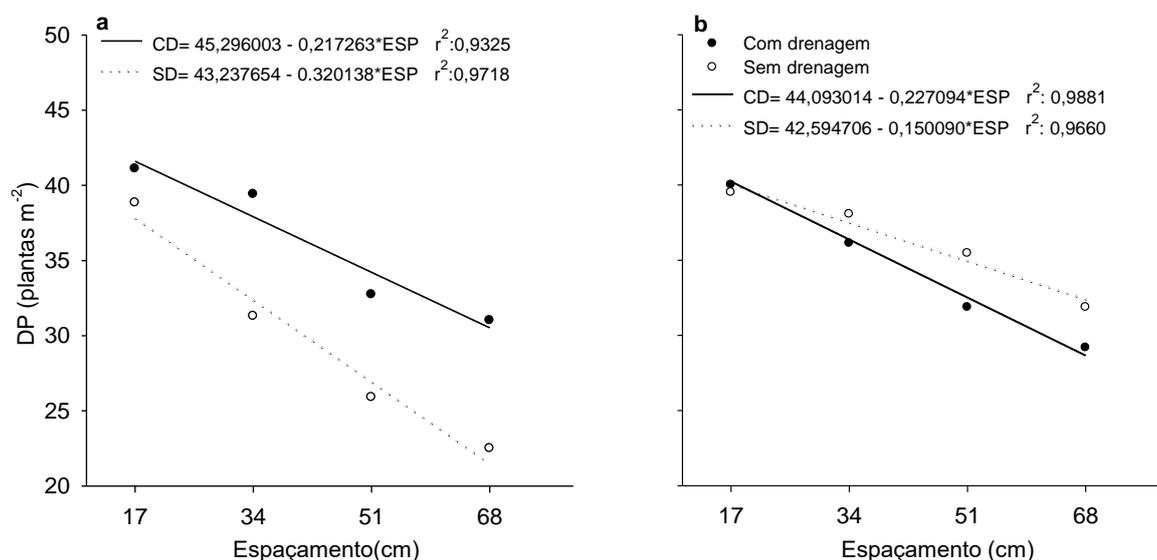
O uso de drenagem superficial do solo em 2018 permitiu a persistência de uma densidade superior de plantas em 5,5, 20,6, 20,9 e 27,5% que no SD, respectivamente nos espaçamentos 0,17, 0,34, 0,51 e 0,68 m (Figura 16a). Esta resposta pode estar associada ao aumento da camada aerada presente no solo pela retirada mais rápida do excesso de água acumulado na superfície após eventos de chuva, bem como a redução do nível de elevação do lençol freático no perfil do solo (SILVA; PARFITT, 2004). Esse aumento da zona aerada do solo tem impacto direto na absorção de nutrientes e trocas gasosas no sistema radicular (JACKSON; COLMER, 2005).

Em 2019, a densidade de plantas no espaçamento 0,17 m foi semelhante entre CD e SD (Figura 16b). Esta resposta pode estar associada às condições mais favoráveis durante ciclo de cultivo da canola em 2019 do que em 2018, como maior disponibilidade de radiação solar (Figura 3), redução de eventos pluviométricos e redução da elevação do nível do lençol freático no perfil do solo (Figura 2).

A utilização de espaçamentos entre linhas superiores a 0,17 m no cultivo de canola, em 2019 também apresentou relação linear negativa na densidade de

plantas (Figura 16b). A modificação do menor para o maior espaçamento reduziu o estande inicial de 40 plantas m^{-2} para 29,2 e 31,9 plantas por m^{-2} no estágio de maturação fisiológicas das plantas, respectivamente, para CD e SD. Neste sentido, o aumento da competição intraespecífica pelo adensamento de plantas na linha de semeadura interfere diretamente na competição por recursos naturais e espaço físico (KRÜGER et al., 2011a), principalmente no espaço ao longo das linhas. Em 2019, a maior disponibilidade de RFA associado a chuvas regulares menos frequentes e prolongadas e drenagem eficiente em ambientes com drenos podem estar associados ao maior crescimento das plantas da canola, levando a uma condição mais intensa de competição intraespecífica. Conforme Zou et al. (2014), em dossel de plantas muito fechados, a redução do estande de plantas está associada a limitação de espaço físico e recursos naturais para seu desenvolvimento, ocorrendo aumento na presença de plantas dominantes e dominadas (suprimidas).

Figura 16 – Densidade de plantas de canola (DP) no momento da colheita, em solos com drenagem superficial (CD) e sua ausência (SD) submetidas a diferentes espaçamentos entre linhas de semeadura em 2018 (a) e 2019 (b). Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

Resultados semelhantes foram obtidos por Kuai et al. (2015), que em espaçamento de 0,15 m entre linhas com 45 plantas m^{-2} observaram menor mortalidade de plantas no dossel, mas com o aumento no espaçamento entre linhas intensificou a redução do estande final. Zou et al. (2014) testando distintos genótipos

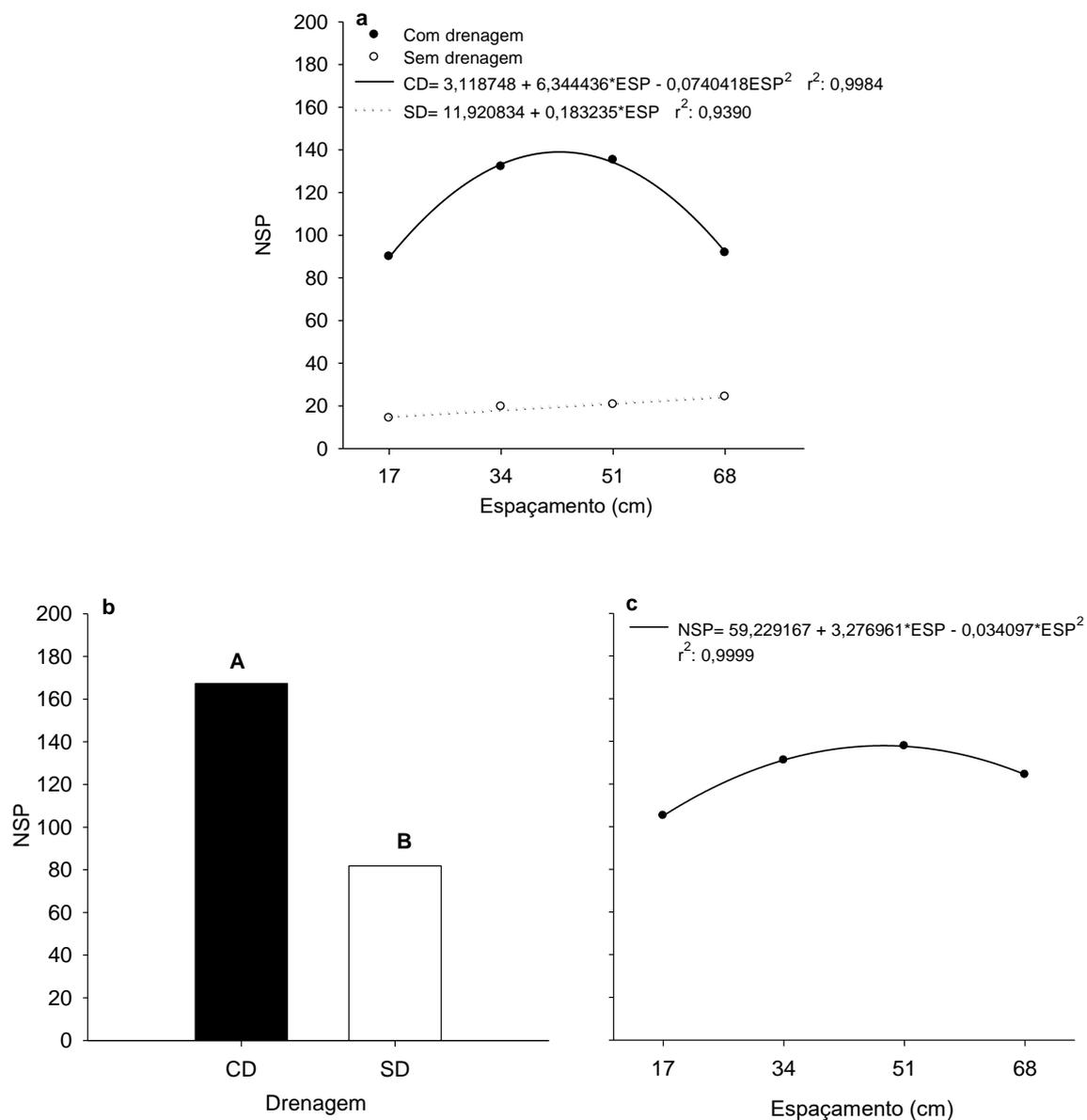
sob efeito de alagamento do solo, encontraram para mais de 50% destes, uma redução significativa na densidade de plantas, com reduções superiores a metade do dossel inicial.

O número de síliquas por planta (NSP) também sofreu influência dos dois fatores nos dois anos. Em 2018, o NSP apresentou interação significativa com efeito quadrático em CD e linear para SD (Figura 17a). No sistema CD ocorreu a máxima emissão síliquas no espaçamento 0,43 m, com 139 síliquas por planta. Sob a ausência de drenos constatou-se um incremento linear de 1,8 síliquas a cada 0,10 m de aumento no espaçamento, totalizando 24 síliquas por planta em 0,68 m (Figura 17a). A redução no NSP na ausência de dreno pode estar diretamente relacionada com a abscisão de folhas, flores e das próprias síliquas sob efeito deletério das alterações fisiológicas na planta, como o aumento da concentração de etileno (AHMED et al., 2013; SILVEIRA et al., 2014). Em 2018, a elevação do lençol freático mais persistente no subperíodo de alongação de hastes pode ter influenciado a redução do NSP na ausência de drenos (WOLLMER; PITANN; MUHLING, 2018).

Em 2019 constatou-se apenas efeitos principais significativos para a variável NSP. No fator drenagem, a utilização de drenos resultou numa superioridade de 205,0% no NSP em relação a SD, totalizando 85,5 síliquas de diferença (Figura 17b). Resultados similares foram obtidos por Rocha (2018), em terras baixas sob o efeito do excesso hídrico em distintos anos de cultivo, obtendo reduções na ordem de 29,9 a 50,3% no NSP devido a não utilização de drenos. Li et al. (2016), também encontraram resultados que corroboram em solos com encharcamento, avaliando a resistência de diferentes genótipos de canola encontraram reduções que variaram de 32,0 a 78,1% no NSP.

No fator espaçamento entre linhas houve ajuste dos dados ao modelo quadrático em 2019, onde o espaçamento de 0,48 m apresentou maior NSP, de 138 síliquas. Na variação do espaçamento, a maior redução do NSP foi observada até o espaçamento 0,17 m, com 23,8% menos, comparados aos 9,8% de redução observados até o espaçamento 0,68 m (Figura 17b). Porém, vários trabalhos obtiveram efeito linear positivo entre NSP e o espaçamento entre linhas, mas em ausência de condições de elevação do lençol freático. Krüger et al. (2011a) na alteração do espaçamento para análise conjunta de diferentes densidades populacionais incluindo 40 plantas m⁻², obtiveram um incremento de 59,9% no NSP do espaçamento de 0,20 para 0,60 m, onde observaram 331 síliquas por planta.

Figura 17 – Número de síliquis por planta de canola (NSP) submetida ao cultivo em ambiente sem (SD) e com a utilização de drenos superficiais (CD) e variação de espaçamento entre linhas de semeadura nas safras 2018 (a) e 2019 (b e c). Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

Bandeira, Chavarria e Tomm (2013), também constataram um aumento de 271,6 para 339,7 no NSP na variação do espaçamento de 0,17 para 0,68 m, porém em análise conjunta para as densidades de 15, 30, 45 e 60 plantas m^{-2} . Neste sentido, a alteração de resposta em ambientes com drenos pode estar associada a maior emissão total de ramos nos espaçamentos maiores (Figura 15). O maior gasto energético em estruturas de ramos pode condicionar a planta a uma redução de fonte de energia para gerar mais síliquis nos maiores espaçamentos.

Para o número de grãos por síliqua (NGS) houve efeito significativo da interação entre fatores (Apêndice E). A inserção de drenagem superficial do solo foi eficiente para contornar as perdas em relação ao excesso hídrico do solo no NGS em 2018 e 2019 (Figura 18). Já o aumento do espaçamento entre linhas de semeadura apresentou resposta negativa para o NGS em 2018 e 2019.

O NGS foi impactado significativamente pela ausência de drenos. Em 2018 e 2019, em média, foram observados 130,8 e 26,5% mais grãos por síliqua para os tratamentos submetidos a CD, se comparado com SD. Neste sentido, a utilização de drenagem superficial no solo em ambientes alagados pode contribuir para o aumento da produtividade da cultura e permitir estabelecer sua semeadura em áreas sob influência de períodos com excesso hídrico. Resultados obtidos por Xu et al. (2015) corroboram com o presente estudo, pois em ambiente sob excesso hídrico por alagamento durante 7 dias na antese, observaram reduções de 24,3% no NGS. Li et al. (2016), testando genótipos tolerantes ao excesso hídrico, observaram que o alagamento determinou uma redução média de 7,0% no NGS na canola.

O maior NGS foi obtido no espaçamento 0,17 m em CD com 15,8 e 23,8 grãos por síliqua, respectivamente, em 2018 e 2019 (Figura 18a e b). Em SD, o mesmo comportamento foi observado para o espaçamento de 0,17 m, sendo o maior NGS de 5,9 e 18,1 grãos em 2018 e 2019, respectivamente. Portanto, pode se afirmar que o ambiente de cultivo tem grande influência sobre esta variável, da mesma forma que a melhor distribuição espacial das plantas. Ao observar as condições de excesso hídrico por meio da elevação do lençol freático no perfil do solo através de leituras realizadas em piezômetros nos dois anos, constata-se que em 2018 houve maior período de saturação hídrica do solo e condições de provável anoxia no solo (Figura 2a). A maior precipitação pluvial aliada a redução de disponibilidade de radiação solar (Figura 3) possivelmente diminuíram a capacidade de absorção de nutrientes e trocas gasosas no solo, condicionaram numa maior mortalidade do sistema radicular, reduziram a capacidade fotossintética da planta, limitaram a disponibilidade de reservas energéticas, reduziram a taxa de polinização e fecundação dos estigmas (JACKSON; COLMER, 2005; MELGAREJO et al., 2014).

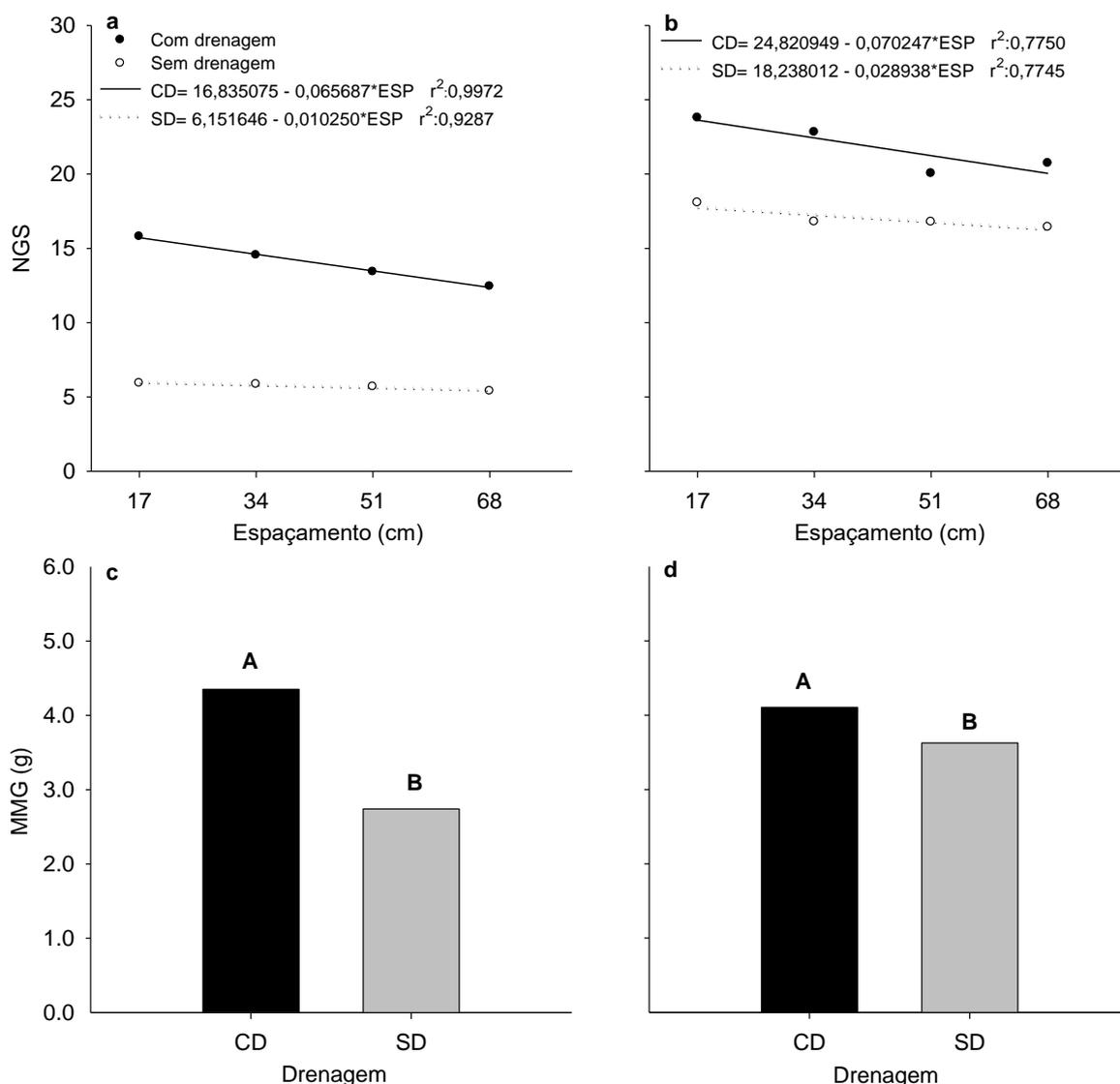
A modificação do espaçamento entre plantas na linha de semeadura afetou de forma linear e negativa o NGS, nos sistemas de drenagem e anos de cultivo. Em 2018, a redução 0,66 e 0,10 grãos a cada 0,10 m de espaçamento foi observada para NGS, respectivamente em CD e SD (Figura 18a). Em 2019, reduções pouco

superiores, de 0,70 e 0,29, no NGS foram constatados em CD e SD (Figura 18b), respectivamente. A redução do número de grãos por síliqua nos espaçamentos maiores pode estar diretamente relacionada a partição de fotoassimilados para variáveis de crescimento vegetativo, ramificação e manutenção do IAF, ao invés de serem destinados sumariamente ao florescimento e ao processo de enchimento dos grãos. Aliado a isso, conforme Kirkegaard et al. (2018), pode-se inferir que o auto sombreamento em detrimento ao adensamento de plantas na linha também apresenta influência negativa sobre NGS, pois em seu estudo observaram uma redução média de até 48,0% no NGS em cultivos no sul da Austrália sob sombreamentos parciais e totais em canola.

Para a variável MMG apenas o fator drenagem apresentou efeito significativo em ambos os anos de cultivo (Figura 18c e d). Em 2018 a MMG foi 58,7% maior no sistema CD em relação a inexistência dos drenos, na qual se obteve 2,74 g para a MMG (Figura 18c). Em 2019 a MMG apresentou comportamento similar a 2018, com menor acúmulo de reservas nos grãos na ausência de drenos (Figura 18d). No sistema CD a massa acumulada para mil grãos foi de 4,10 g, o que representa uma superioridade de 13,3% para SD. As plantas de canola sob CD foram submetidas a um estresse menor que SD, assim, conseguiram destinar mais fotoassimilados de reservas no processo de enchimento de grãos em CD que em SD. Conforme Colmer e Greenway (2005) sob anoxia, o catabolismo anaeróbico se torna mais um dreno de carboidratos na planta em detrimento da síntese de energia. Associado a isso, conforme esses autores, a emissão de novas estruturas reprodutivas sob efeito deletério do excesso hídrico em SD restringem mais a disponibilidade de reservas a serem translocados para os grãos que em CD.

Apesar da condição mais favorável para crescimento e desenvolvimento da canola em 2019, foi em 2018 que se observou a maior MMG em 6,1% nos tratamentos com drenos. Esta variação entre anos pode estar associada na safra de 2018 possuir menor NGS e NSP, resultando assim em mais fotoassimilados translocados para um menor número final de grãos, e por consequência, sob condições mais favoráveis na fase de enchimento de grãos, maior acúmulo de massa em seus grãos.

Figura 18 – Número de grãos por síliqua (NGS, a e b) e massa de mil grãos (MMG, c e d) de canola submetida a diferentes espaçamentos entre linhas de semeadura com (CD) e sem (SD) drenagem superficial do solo em ambiente com déficit de drenagem superficial natural do solo em 2018 (a, c) e 2019 (b, d). Santa Maria, 2021



Fonte: Autor.

Neste sentido, valores de MMG em CD são similares ao cultivo de canola em solos sem influência do excesso hídrico. Valores de 3,49 g obtidos por Tomm et al. (2008), 4,1g por Bagheri, Sharghi e Yazdani (2011), 3,6 g por Krüger et al. (2011b), 3,6 e 4,1 g por Nied (2013) em distintos ambientes e anos, bem como de 3,0 a 3,5 g por Bottega et al. (2020) são similares e/ou pouco inferiores aos obtidos em ambiente sob excesso hídrico submetido a drenagem superficial.

Na produtividade de grãos (PG) houve interação significativa entre espaçamento das fileiras de semeadura e utilização de drenagem superficial do solo

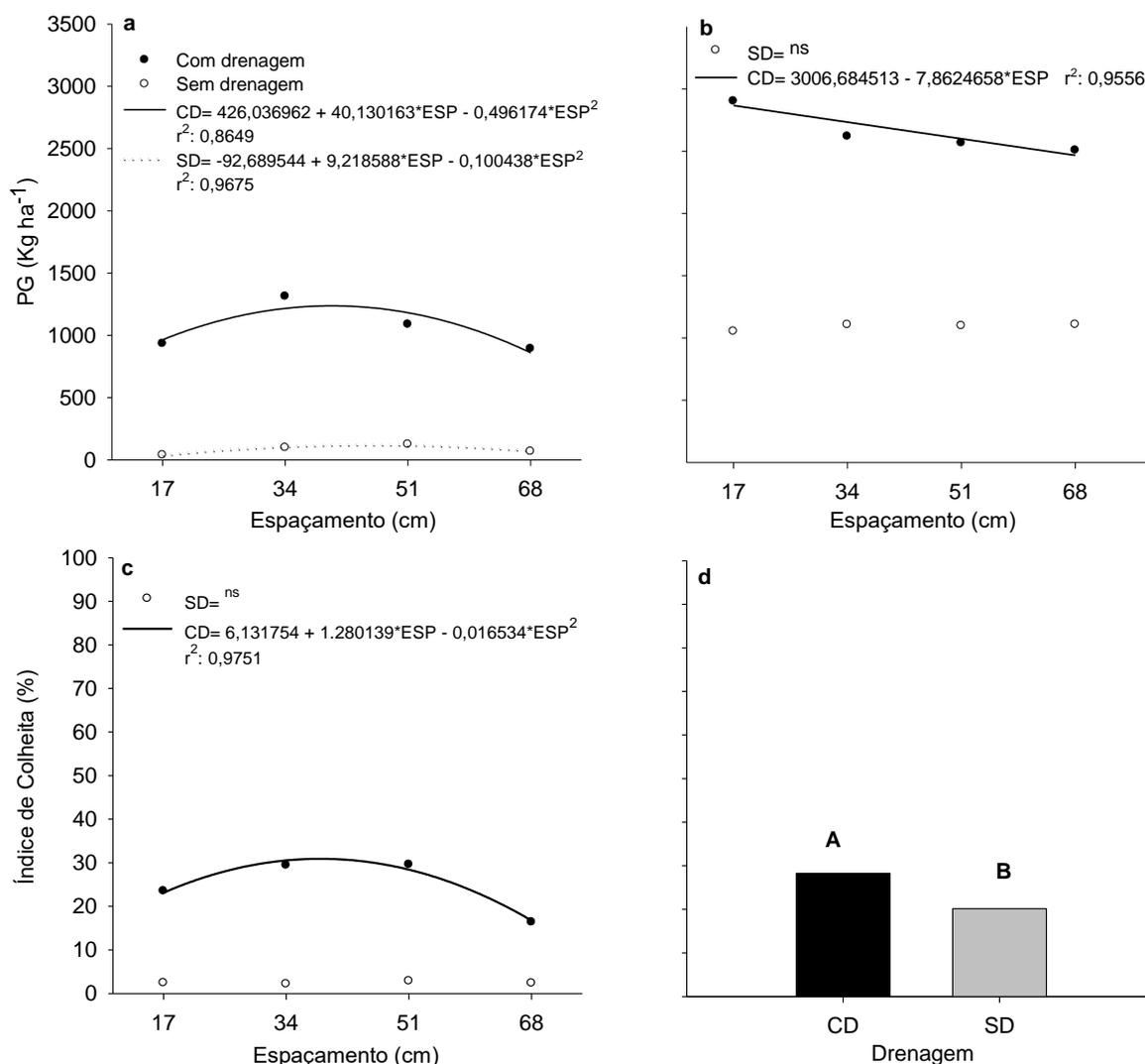
tanto em 2018 quanto em 2019 (Apêndice E). Nos dois anos experimentais, na condição CD foi verificada produtividade maior que em SD. Em 2018, a PG teve resposta quadrática significativa tanto em CD e SD (Figura 19a). Em CD, a máxima eficiência produtiva de grãos ajustada pelo modelo foi estimada no espaçamento de 0,41 m com 1237,3 Kg ha⁻¹, ou seja, 10,7 vezes maior que SD, onde foi observada a produtividade máxima no espaçamento 0,46 m de apenas 118,8 Kg ha⁻¹.

Em 2019, o aumento da competição intraespecífica na linha de semeadura afetou negativamente a PG, com redução linear em CD (Figura 19b). No espaçamento 0,17 m obteve-se a maior produção de grãos (2901,1 Kg ha⁻¹), com ganhos superiores de 15,7% em relação ao maior espaçamento 0,68 m. Já para SD a produtividade média foi de 1090,2 Kg ha⁻¹, o que representa apenas 37,6% do maior rendimento obtido em 0,17 m em CD.

A redução da produtividade de grãos com a modificação do espaçamento entre linhas de semeadura também foi observada por Chavarria et al. (2011), que no espaçamento 0,17m encontraram maior PG (2600,0 Kg ha⁻¹). Bandeira, Chavarria e Tomm (2013) utilizando o mesmo espaçamento entre linhas de semeadura colheram 1.041,3 kg ha⁻¹ de grãos, e com o aumento do espaçamento para 0,68 m verificaram redução da PG para 576,7 kg ha⁻¹. Krüger et al. (2011b) e Krüger et al. (2014) em espaçamento de 0,20 m, obtiveram 1.381,0 e 969,0 Kg ha⁻¹, porém com a alteração do espaçamento para 0,60 m observaram uma redução da PG para 848,0 e 834,0 Kg ha⁻¹, respectivamente. Verifica-se que existe muita disparidade na literatura sobre rendimento da cultura da canola sob variação do espaçamento das linhas de semeadura, tal como verificado entre os resultados obtidos nos anos de 2018 e 2019. As diferentes produtividades de grãos observadas nos experimentos podem indicar que a cultura da canola é fortemente afetada pelo ambiente, manejos e genótipos empregados no cultivo.

Em situações de excesso hídrico do solo, vários trabalhos também encontraram resultados significativos em resposta ao efeito deletério do alto nível de umidade no solo na PG. Zou et al. (2014) e Nabloussi et al. (2019) observaram perdas de rendimento entre 50,0 e 56,0%, respectivamente, no continente asiático. No sul do Brasil, Tartaglia (2016), Rocha (2018) e Santos et al. (2020) também observaram reduções de produtividade de grãos, que foram, respectivamente, de 874,4, 803,23 e 194,9 kg ha⁻¹, inferiores aos solos com remoção do excesso hídrico superficial e subsuperficial.

Figura 19 – Produtividade de grãos da cultura da canola (PG: a e b) e índice de colheita (IC: c e d) de canola submetida à variação de espaçamento entre linhas de cultivo em ambientes com presença (CD) ou ausência de drenagem superficial do solo (SD) em 2018 (a, c) e 2019 (b, d). Santa Maria, RS, 2021. (ns: não significativo a 5% probabilidade de erro pelo teste de Scott-Knott; r^2 : coeficiente de determinação).



Fonte: Autor.

No manejo de utilização de drenos, a PG superior também foi obtida por Tartaglia (2016), Rocha (2018) e Santos et al. (2020), onde ganhos na produtividade de grãos de 153,4, 812,6 e 126,9% foram observados com a introdução de drenagem superficial do solo no cultivo de canola. Portanto, a drenagem superficial do excesso hídrico apresenta-se um manejo essencial para mitigar os efeitos adversos decorrentes de períodos excessivamente chuvosos para cultivos de canola em solos naturalmente mal drenados (GOULART; REICHERT; RODRIGUES, 2020).

Na comparação entre os anos de cultivo, em 2019 foi observado uma produtividade de grãos superior ao ano de 2018, em CD. Este ganho em produtividade pode estar associado às condições ambientais às quais a cultura foi exposta nos dois anos. Em 2018 o excesso hídrico intenso associado a menor disponibilidade de radiação solar no subperíodo de alongamento da haste e período de enchimento de grãos podem ter impactado diretamente na redução do acúmulo de reservas na planta (COLMER; GREENWAY, 2005). Além disso, o aumento da emissão de novas estruturas vegetativas como ramos (Figura 15) limitaram os assimilados disponíveis para emissão de um número maior de estruturas reprodutivas. Já em 2019, a redução dos períodos com elevação do lençol freático do solo (Figura 2b) aliados a redução do NRT (Figura 15), maior densidade e altura final de plantas em relação a 2018, podem ter favorecido o incremento da PG. Ploschuk, Miralles e Striker (2021), seccionando o efeito do alagamento nos distintos subperíodos do desenvolvimento da canola, encontraram maior dano potencial na antese, com 42,0 a 69,0% de perdas em PG, em comparação aos 17,0 e 30,0% observados no período vegetativo.

Quando analisadas as maiores PG obtidos nos dois anos em CD, de 1056,1 e 2901,1 kg ha⁻¹, pode-se destacar que estes resultados estão englobados pela flutuação de rendimentos observados na região Sul do Brasil por lavouras comerciais, onde produtividades médias de 799,0, 1398,0 e 1441,0 e 901,0 kg ha⁻¹ foram observados entre os anos de 2017 a 2020, respectivamente (CONAB, 2021). Neste sentido, terras baixas podem ser uma alternativa para a obtenção de rendimentos tão satisfatórios quanto em terras altas em períodos de ociosidade das áreas cultiváveis. A safra 2019 se destaca na superioridade produtiva em relação à média regional de produção de grãos de canola, o que representa a existência de anos nos quais o potencial produtivo de terras baixas é muito benéfico para a cultura da canola, contando com a utilização de técnicas adequadas de cultivo, como a drenagem superficial do solo. Um aspecto importante é que a drenagem superficial utilizada no cultivo de soja na primavera-verão (BETEMPS, 2021) pode ser aproveitada e empregada em canola no outono-inverno, reduzindo custos e ampliando as possibilidades de retorno econômico com o manejo das culturas de primavera/verão.

No índice de colheita apenas em 2018 se observou interação entre os fatores estudados. Na utilização de drenos no sistema de cultivo, houve resposta quadrática

para a variação dos espaçamentos (Figura 19c). Dentre os espaçamentos estudados, no espaçamento de 0,39 m obteve-se o maior IC com 30,9%. Resultado semelhante foi obtido por Mulvaney et al. (2019), porém em *Brassica carinata*, onde no espaçamento de 0,36 m obtiveram melhor índice de colheita. Na variação do espaçamento entre linhas em CD, o aumento do espaçamento para 0,68 m houve maior redução do IC em relação a utilização do 0,17 m, respectivamente, 45,9 e 25,1% (Figura 19c). A maior redução no nível com maior distância entre fileiras pode estar relacionada a menor DP final e NGS, correlacionados diretamente com o rendimento final de grãos, além do maior incremento vegetativo do NRQ estimulado pela plasticidade fenotípica da cultura (KRÜGER et al., 2011b), mas sem a formação correspondente de estruturas reprodutivas.

Para os tratamentos com ausência de drenagem superficial do solo, o IC não diferiu entre os diferentes espaçamentos, apresentando um índice de colheita médio de apenas 2,5%. Este valor pode estar diretamente associado à pequena produtividade de grãos em SD em 2018, com número restrito de síliques por planta e grãos por síliques, além de uma MMG e DP final menor. Conforme Liu et al. (2020), em condições de excesso hídrico, a canola é estimulada emissão de novas estruturas em resposta a abscisão de folhas, flores e síliques. Este gasto energético adicional na emissão de novas estruturas limita a disponibilidade de energia para o crescimento da planta, principalmente dos ráceros, podendo neste sentido favorecer ainda mais plasticidade fenotípica da cultura pelo aumento de ocupação do espaço físico, prejudicando as relações entre fonte e dreno na parte vegetativa da planta.

Em 2019, no IC observou-se apenas efeito do fator principal drenagem superficial do solo, com IC de 28,3 e 20,2%, respectivamente em condições de CD e SD. Este fato pode estar associado diretamente ao maior incremento dos componentes de rendimento em CD, enquanto em SD as plantas foram induzidas a destinar maior fração de energia no processo de emissão de novos ramos, reduzindo assim o NSP, NGS e a MMG. Resultados obtidos por Dalmago et al. (2017) em solos bem drenados com cultivo de canola com o genótipo Diamond, em que obtiveram IC em torno de 25,0%, corroboram para os resultados obtidos em CD. Neste sentido, o uso de solos com drenagem superficial por meio de sulcos se torna uma alternativa importante na prospecção de aumento da produção de grãos para a cultura da canola no cenário agrícola de terras baixas.

As análises de correlação entre os caracteres de crescimento e de produtividade de canola em terras baixas de forma conjunta (geral) e por sistema de drenagem superficial estão representados na Tabela 2. Na análise conjunta, a PG se correlacionou positivamente com NSP e NGS e AP.

A correlação entre PG e a DP foi fraca. Porém, na análise do ambiente separadamente (ano de cultivo e fator drenagem) observa-se correlações com coeficientes variados, sendo 0,52 e -0,15 os coeficientes observados em 2018 e 2019 (Ano de cultivo, Apêndice C), -0,08 e 0,98 para CD e SD (Fator drenagem, Tabela 2), respectivamente. Neste sentido, a maior redução da densidade final de plantas (DP) em 2018 em relação a 2019 para SD, relacionou-se diretamente com a produtividade de grãos menor obtida em 2018 e maior em 2019 (Figura 16). Já a inexistência de correlação em CD pode estar relacionada ao estande final médio em 2018 ser pouco maior que 2019 (36,1 e 34,4 plantas m⁻², respectivamente) e ter contribuído com rendimentos contrastantes entre 2018 e 2019. A análise de correlação para os diferentes espaçamentos utilizados no estudo corrobora com este resultado, onde os coeficientes foram muito similares entre si para correlação entre PG e DP (Apêndice D).

Conforme Krüger et al. (2011a), a produtividade de grãos está diretamente relacionada com a expressão linear positiva do NSP com o NGS. Correlações positivas fortes entre NSP e NGS foram observadas também por vários autores em locais distintos, como Diepenbrock (2000), Basalma (2008), Krüger et al. (2011b), e Hossain et al. (2019) no continente asiático e americano, corroborando com este trabalho para esta oleaginosa. Para Khayat, Lack e Karami (2012) coeficientes de correlação linear positivos de 0,71 (AP), 0,95 (NSP), 0,57 (NGS) e 0,91 (MMG) com PG no sudoeste do Irã foram observados em *Brassica napus*. Nied (2013), para diferentes datas de semeadura, encontrou correlações positivas da produtividade com DP (0,46), NGS (0,59) e MMG (0,36) em distintos anos de cultivo em Passo Fundo, RS em coxilha. Nabloussi et al. (2019), encontraram correlação alta entre NSP e PG, destacando que as perdas em ambiente alagado de 55,0% no NSP, impactaram numa redução potencial de 56,0% no rendimento de sementes.

Na análise de correlação da PG com NRT, NRQ e NTR, observou-se forte correlação negativa. Dentre os caracteres de crescimento no geral, a variável NRT apresentou associação negativa mais forte com a produtividade de grãos (-0,89). Este resultado pode ter relação direta com o desprendimento de reservas da planta

para a emissão destas estruturas, limitando sua disponibilidade para o enchimento de grãos (LIU et al., 2020; PLOCHUK et al., 2018). Corroborando neste sentido, está a correlação linear negativa forte observada entre NTR com AP, NSP e NGS para os dados gerais do experimento (Tabela 2). Conforme Krüger et al. (2011b) e Chen et al. (2014), caracteres com efeito compensatório estão diretamente relacionados com os componentes de rendimento e crescimento vegetal, sendo variáveis como a altura de planta e o número de ramos altamente impactantes nas variáveis NSP e NGS. Neste trabalho, os valores dos coeficientes corroboram neste sentido, para os caracteres NSP e NGS, pois o NTR apresentou alta correlação negativa (-0,71 e -0,92) e AP apresentou correlação positiva (0,63 e 0,84). Segundo Ejaz-Ul-Hasan et al. (2016), a limitação de carboidratos de reserva na planta (fonte) em relação ao aumento dos drenos no vegetal, induz à redução da emissão do NSP para assegurar o enchimento adequado dos grãos nas síliquas remanescentes.

A DP apresentou forte correlação positiva com NSP e NGS, e correlação negativa forte com NRT, NTR e IC somente em SD (Tabela 2). Esse resultado pode ser explicado pela plasticidade fenotípica presente na cultura da canola, onde a maior redução da DP (Figura 16) induz à maior emissão de ramos, especialmente ramos terciários, na tentativa de contornar a abscisão foliar, flores e síliquas em solos com elevação do lençol freático sem a presença de drenagem superficial. Assim, o alto coeficiente de correlação negativo entre DP e IC em SD pode estar associado ao gasto energético demasiado na emissão de novas estruturas, limitando assim, sua disponibilidade para o processo de enchimento dos grãos. Em uma provável anoxia, a baixa produção de fotoassimilados, o catabolismo anaeróbico e plasticidade fenotípica podem ter proporcionado uma restrição de reservas na planta (COLMER; GREENWAY, 2005; KRÜGER et al., 2011b; ZHU, 2016), o que afetou não só o enchimento de grãos, mas também a capacidade de emissão e fixação de síliquas e o processo de fecundação floral (MELGAREJO et al., 2014).

A massa de mil grãos apresentou pouca variabilidade entre coeficientes de correlação com a PG nos dois anos e diferentes espaçamentos (Apêndice C e D). Conforme Marjanovic-Jeromela et al. (2011), a maior estabilidade da MMG pode ter relação com caracteres genéticos da planta. Araújo (2020), reforça este resultado em sua pesquisa em canola submetida ao cultivo no cerrado em condições excludentes de excesso hídrico, onde observou que a MMG apresentou de fraca a nula correlação linear com a produtividade e demais componentes de rendimento.

Tabela 2 – Coeficientes de correlação fenotípica entre caracteres de crescimento e produtividade da cultura da canola em ambiente de terras baixas submetidas a drenagem superficial do solo (CD) e sua ausência (SD). Santa Maria, RS, 2021.

Caractere	PG	AP	DP	NSP	NGS	MMG	NRS	NRT	NRQ	NTR	IC
Análise conjunta											
PG	1	0.83**	0.28	0.90**	0.92**	0.58**	-0.55**	-0.89**	-0.79**	-0.86**	0.82**
AP		1	0.22	0.63**	0.84**	0.27*	-0.68**	-0.87**	-0.89**	-0.92**	0.56**
DP			1	0.24	0.47**	0.44**	-0.32**	-0.23	-0.39**	-0.33**	0.44**
NSP				1	0.84**	0.67**	-0.50**	-0.73**	-0.64*	-0.71**	0.90**
NGS					1	0.63**	-0.77**	-0.87**	-0.87**	-0.92**	0.86**
MMG						1	-0.41**	-0.42**	-0.40**	-0.44**	0.78**
NRS							1	0.60**	0.77**	0.77**	-0.63**
NRT								1	0.85**	0.95**	-0.65**
NRQ									1	0.97**	-0.66**
NTR										1	-0.70**
IC											1
Com drenagem superficial do solo (CD)											
PG	1	0.98**	-0.08	0.76**	0.94**	-0.28	-0.62**	-0.94**	-0.93**	-0.94**	0.47*
AP		1	-0.16	0.75**	0.93**	-0.31	-0.63**	-0.96**	-0.93**	-0.95**	0.39*
DP			1	-0.34	0.12	0.22	-0.12	0.01	-0.04**	-0.02	0.10
NSP				1	0.65**	-0.26	-0.39*	-0.68**	-0.74**	-0.71**	0.66**
NGS					1	-0.26	-0.68**	-0.95**	-0.93**	-0.96**	0.42*
MMG						1	0.31	0.3	0.34	0.32	0.09
NRS							1	0.70**	0.72**	0.75**	-0.27
NRT								1	0.94*	0.99**	-0.39*
NRQ									1	0.98**	-0.52**
NTR										1	-0.45*
IC											1
Sem drenagem superficial do solo (SD)											
PG	1	0.96**	0.98**	0.58**	0.89**	0.98**	-0.71**	-0.92**	-0.81**	-0.91**	-0.93**
AP		1	0.98**	0.53**	0.93**	0.97**	-0.72**	-0.90**	-0.75**	-0.90**	-0.90**
DP			1	0.58**	0.92**	0.99**	-0.70**	-0.93**	-0.79**	-0.91**	-0.92**
NSP				1	0.47*	0.59**	-0.51*	-0.37*	-0.35	-0.57*	-0.48*
NGS					1	0.92**	-0.64**	-0.85**	-0.64*	-0.79**	-0.80**
MMG						1	-0.71**	-0.93**	-0.80**	-0.90**	-0.92**
NRS							1	0.64**	0.59**	0.72**	-0.70*
NRT								1	0.78**	0.86**	0.91**
NRQ									1	0.82**	0.93**
NTR										1	0.97**
IC											1

PG: Produtividade de grãos; AP: Altura de planta; DP: Densidade de planta; NSP: Número de síliquis por planta; NGS: Número de grãos por síliqua; MMG: Massa de mil grãos; NRS: Número de ramos secundários; NRT: Número de ramos terciários; NRQ: Número de ramos quaternários; NTR: Número total de ramos. * e **, significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste “t”, respectivamente.

Fonte: Autor.

Neste sentido, o resultado obtido neste experimento para a correlação entre PG e MMG corrobora para CD, porém a condição adversa gerada pelo excesso hídrico determinou correlação altamente significativa. Na ausência de drenagem, a alta correlação positiva observada pode estar relacionada a redução do número de grãos por área, sendo a MMG com grande interferência na produtividade final da cultura.

A correlação fenotípica na modificação dos espaçamentos entre linhas (Apêndice D) apresentou correlações lineares semelhantes à análise geral (Tabela 2). Porém destacou-se a forte correlação positiva entre PG com NSP e com NGS, variando entre 0,91 e 0,97 nos quatro espaçamentos estudados. Resultados similares foram obtidos por Krüger et al. (2011b), testando espaçamentos de 0,20, 0,40 e 0,60 m, em que também obteve correlações muito fortes entre PG e os componentes NSP e NGS em seus espaçamentos.

Nos caracteres de crescimento, o NTR correlacionou-se negativamente com a produtividade de grãos em todos os espaçamentos, ocorrendo a maior correlação linear negativa com PG no espaçamento de 0,51 m (Apêndice D). No índice de colheita, apesar da pouca variabilidade entre espaçamentos, a maior e a menor equidistância entre plantas apresentaram maior correlação negativa entre IC e NRT, sendo em 0,17 m constatado o maior coeficiente negativo (-0,86).

Assim, na análise dos coeficientes de correlação, observou-se de maneira geral que caracteres de rendimento e crescimento estão diretamente associados a condição de cultivo ao qual a cultura da canola foi submetida e seu potencial produtivo. O NSP e NGS são caracteres que apresentaram maior correlação positiva com a produtividade da cultura, já, o NRT e NTR foram caracteres que mais impactaram negativamente a produção final de grãos da cultura da canola em excesso hídrico do solo e na variação do arranjo espacial das plantas.

4.4 CONCLUSÃO

A ausência de drenagem superficial em ambientes com excesso hídrico do solo favorece a maior emissão de ramos laterais na planta de canola, principalmente de ramos terciários.

A redução produtividade de grãos da cultura de canola em terras baixas está diretamente relacionada a intensidade do excesso hídrico, podendo ser mitigada pela presença de drenagem superficial.

A falta de uso de drenagem superficial do solo diminui a altura de planta.

O uso de drenos aumenta a produção de síliquas, grãos por síliqua e massa dos grãos, condicionando menor produtividade de canola.

Na ausência da condição de excesso hídrico no cultivo de canola, a maior equidistância entre plantas (0,17 m) proporciona maior incremento de grãos por síliqua e produtividade de grãos. Porém, em condições ambientais com elevação do lençol freático até a superfície, o espaçamento intermediário de 0,45 m resulta em maior número de síliquas, produtividade de grãos e índice de colheita.

O excesso hídrico limita a capacidade de expressão da plasticidade fenotípica da cultura da canola em espaçamentos com grande competição intraespecífica na linha de semeadura (0,68 m).

O número de síliquas e de grãos por planta apresentam forte correlação positiva com a produtividade de grãos da canola cultivada em terras baixas.

O cultivo de canola é viável em terras baixas ou solos com elevação temporária do lençol freático mediante a utilização de drenagem superficial do solo através de sulcos com profundidade de 0,25 m.

4.5 REFERÊNCIAS

AHMED, F. et al. Waterlogging tolerance of crops: breeding, mechanism of tolerance, molecular approaches, and future prospects. **BioMed Research International**, v. 1, n. 1. p. 1-10, 2013.

ARAÚJO, L. N. de. **Desempenho de genótipos de canola no núcleo do Cerrado**. 2020. 51 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

BAGHERI, H.; SHARGHI, Y.; YAZDANI, M. The study of planting density on some agronomic traits of spring canola cultivars. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 5, n. 1, p. 1302-1305, 2011.

BANDEIRA, T. P.; CHAVARRIA, G.; TOMM, G. O. Desempenho agrônômico de canola em diferentes espaçamentos entre linhas e densidades de plantas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 10, p. 1332-1341, out., 2013.

BARRERA-ROJAS, C. H. et al. MiR156-targeted SPL10 controls Arabidopsis root meristem activity and root-derived de novo shoot regeneration via cytokinin responses. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 3, p. 934-950, jan., 2020.

BASALMA, D. The Correlation and Path Analysis of Yield and Yield Components of Different Winter Rapeseed (*Brassica napus* ssp. *oleifera* L.) Cultivars. **Research Journal of Agriculture and Biological Sciences**, v. 4, n. 2, p. 120-125, 2008.

BATISTA-SILVA, W. et al. Modulation of auxin signalling through DIAGETROPICA and ENTIRE differentially affects tomato plant growth via changes in photosynthetic and mitochondrial metabolism. **Plant Cell and Environment**, v. 42, n. 2, p. 448-465, fev., 2019.

BETEMPS, C. **Técnica é capaz de aumentar produtividade de grãos em 26 sacas por hectare no Sul**. EMBRAPA. Brasília, 15 jun. 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/62880364/tecnica-e-capaz-de-aumentar-produtividade-de-graos-em-26-sacas-por-hectare-no-sul?p=GUmB676Y>>. Acesso em: 20 jun de 2021.

BORTOLUZZI, M. P. **Probabilidade de ocorrência de excesso hídrico para a cultura da soja em planossolos da região central do Rio Grande do Sul**. 2015. 88 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

BORTOLUZZI, M. P. **Risco de ocorrência de excesso e déficit hídrico na soja em terras baixas**. 2019. 164 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

BOTTEGA, E. L. et al. Desempenho produtivo de genótipos de canola na região central do rio grande do sul. **American Crop Journal**, v. 29, n. 1, p. 1-10, 2020.

BURIOL, G. A. et al. Homogeneidade e estatísticas descritivas dos totais mensais e anuais de chuva de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 1, p. 89-97, 2006.

CANOLA COUNCIL. **History of Canola Seed Development**. Canola Encyclopedia, Winnipeg, 20 jul. 2021. Disponível em: <<https://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/history-of-canola-seed-development/>>. Acesso em: 20 jul. 2021.

CHAVARRIA, G. et al. Índice de área foliar em canola cultivada sob variações de espaçamento e de densidade de semeadura. **Ciência Rural**, v. 41, n. 12, p. 2084-2089, 2011.

CHEN, B. et al. Evaluation of yield and agronomic traits and their genetic variation in 488 global collections of *Brassica napus* L. **Genetic Resources and Crop Evolution**, n. 61, n. 1, p. 979-999, 2014.

COLMER, T. D.; GREENWAY, H. Oxygen Transport, Respiration, and Anaerobic Carbohydrate Catabolism in Roots in Flooded Soils. In: LAMBERS H., RIBAS-CARBO M. **Plant Respiration. Advances in Photosynthesis and Respiration**, v. 18. Springer, Dordrecht. 2005. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-3589-6_8>. Acesso em: 15 mar. 2021.

CONAB. **Safra - Estimativa de Evolução de Grãos**. Brasília, 31 jun. 2021. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>>. Acesso em: 31 jun. 2021.

DALMAGO, G. A. et al. Respostas da canola à disponibilidade de água no solo. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CANOLA, 2017, Passo Fundo/RS. **Anais...** Passo Fundo/RS: Embrapa Trigo, 2017. v. 1. p. 262-267. Disponível em:

<<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/170459/1/ID44280-2017CBAGRO20RA414.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2021.

DALMAGO, G. A. et al. **Potencial de aplicação da Agrometeorologia em agricultura de precisão para a produção de grãos**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2015. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/116173/1/2014-LV-agricultura-de-precisao-p331.pdf>>. Acesso em: 21 jan. 2021.

DIEPENBROCK, W. Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. **Field Crops Research**, v. 67, n. 1, p. 35-49, 2000.

EJAZ-UL-HASAN et al. Correlation and path coefficient studies in elite lines of rapeseed (*Brassica napus* L.). **Journal of Agriculture and Basic Sciences**, v. 1, n. 2, p. 54-59, 2016.

EMYGDIO, B. M.; ROSA, A.; OLIVEIRA, S. **Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 341 p. ISBN 978-85-7035-677-2.

FERREIRA, D. F. Sisvar: um Guia para seus procedimentos bootstrap em múltiplas comparações. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014.

FERREIRA, R. M. et al. Uso de camalhões para o cultivo de canola em várzeas. In: I SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE CANOLA. Passo fundo, RS. 2014. pp. 1-5. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/slac/cd/pdf/Ferreira%20-%20Uso%20de%20camalhoes....pdf>>. Acesso em jun. 2021.

FONTOURA JÚNIOR, J. A. S. et al. Simulação de diferentes arranjos de sistemas integrados em áreas de várzea. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 630-659, ago., 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Countries by commodity: Oilseeds**. 2021. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countriesbycommodity>>. Acesso em: 10 jun. 2021.

GAMALERO E.; GLICK B. R. Tolerância ao estresse etileno e abiótico nas plantas. In: Ahmad P., Prasad M. **Adaptações ambientais e tolerância ao estresse das plantas na era das mudanças climáticas**. Springer, Nova Iorque, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0815-4_18. 978-1-4614-0814-7>. Acesso em: 21 mai. 2021.

GIBBS, J.; GREENWAY, H. Review: Mechanisms of anoxia tolerance in plants. I. Growth, survival and anaerobic catabolism. **Functional Plant Biology**, v. 30, n. 1, p. 1-47, 2003.

GOULART, R. Z. **Manejo de solo de várzea para cultivo de soja, milho e forrageiras hibernais na fronteira oeste gaúcha**. 2016. 82 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

GOULART, R. Z.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F. Cropping poorly-drained lowland soils: Alternatives to rice monoculture, their challenges and management strategies. **Agricultural Systems**. v. 177, n. 1, p. 102715-102722, jan., 2020.

GULARTE, J. A.; MACEDO, V. G. K.; PANOZZO, L. E. Produção e mercado de sementes de canola no Brasil. **Applied Research e Agrotechnology**, v. 13, n. 1, p. 1-9, 2020.

GUO, Y. et al. Effects of waterlogging stress on early seedling development and transcriptomic responses in *Brassica napus*. **Molecular Breeding**, v. 40, n. 85, p. 1-15, 2020.

GURGEL, A. L. C. et al. Compactação do solo: Efeitos na nutrição mineral e produtividade de plantas forrageiras. **Revista Científica Rural**, v. 22, n. 1, p. 13-29, 2020.

HABIBZADEH, F. et al. Alleviation of waterlogging damage by foliar application of nitrogen compounds and tricyclazole in canola. **Australian Journal of Crop Science**, v. 7, n. 3, p. 401-406, 2013.

HELDWEIN, A. B.; BURIOL, A. G.; STRECK, N. A. O clima de Santa Maria. **Ciência e Ambiente**, v. 38, n. 1, p. 43-58, 2009.

HOSSAIN, Z. et al. Plant establishment, yield and yield components of *Brassicaceae* oilseeds as potential biofuel feedstock. **Industrial Crops and Products**, v. 141, n. 1, p. 111800, dez., 2019.

JACKSON M. B.; COLMER T.D. Response and adaptation by plants to flooding stress. **Annals of Botany**, v. 96, n. 4, p. 501-505, set., 2005.

KADIOGLU, H. **Groundwater table effects on yield, growth and water use of canola (*Brassica napus* L.) plant**. 2019. 57 p. (Master of Science) - North Dakota State University of Agriculture and Applied Science, North Dakota, 2019.

KHAYAT, M.; LACK, S.; KARAMI, H. Correlation and Path Analysis of Traits Affecting Grain Yield of Canola (*Brassica napus* L.) Varieties. **Journal Basic and Applied Scientific Research**, v. 2, n. 6, p. 5555-5562, 2012.

KIRKEGAARD, J. A. et al. The critical period for yield and quality determination in canola (*Brassica napus* L.). **Field Crops Research**, v. 222, n. 1, p. 180-188, jun., 2018.

KREUZWIESER, J.; RENNENBERG, H. Molecular and physiological responses of trees to waterlogging stress. **Plant, Cell e Environment**, v. 37, n. 10, p. 2245-2259, 2014.

KRÜGER, C. A. M. B. **Arranjo de plantas e seus efeitos na produtividade de grãos e teor de óleo em canola**. 2011. 89 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

KRÜGER, C. A. M. B. et al. Arranjo de plantas na expressão dos componentes de produtividade de grãos de canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 1, p. 1448-1453, 2011a.

KRÜGER, C. A. M. B. et al. Herdabilidade e correlação fenotípica de caracteres relacionados à produtividade de grãos e à morfologia da canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 12, dez., p. 1625-1632, 2011b.

KRÜGER, C. A. M. B. et al. Relações de variáveis ambientais e subperíodos na produtividade e teor de óleo em canola. **Ciência Rural**, v. 44, n. 9, p. 1671-1677, set., 2014.

KRÜGER, C. A. M. B. Interceptação da radiação fotossinteticamente ativa por canola em distintas condições de cultivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 20.; SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICAÇÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 5., 2017, Juazeiro/CE. **Anais...** Juazeiro/CE: Embrapa Semiárido, 2017, p. 1 – 5.

KUAI, J. et al. The yield of mechanically harvested rapeseed (*Brassica napus* L.) can be increased by optimum plant density and row spacing. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 18835-18845, 2015.

LI, Z. et al. Mapping of QTL associated with waterlogging tolerance and drought resistance during the seedling stage in oilseed rape (*Brassica napus*). **Euphytica**, v. 197, n. 31, p. 341–353, 2014.

LI, H. et al. Consistency of Different Indices in Rapeseed (*Brassica napus*) may Predict the Waterlogging Tolerance. **International Journal of Agriculture and Biology**. v. 18, n. 1, p. 61-67, 2016.

LIU, M. et al. Properties of root water transport in canola (*Brassica napus*) subjected to waterlogging at the seedling, flowering and podding growth stages. **Plant Soil**, v. 454, n. 1, p. 431–445, 2020.

LORETI, E.; VEEN, H. V.; PERATA, P. Plant responses to flooding stress. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 33, n. 1, p. 64-71, out., 2016.

MARJANOVIC-JEROMELA, A. et al. Variability of yield determining components in winter rapeseed (*Brassica napus* L.) and their correlation with seed yield. **Genetika**, v. 43, n. 1, p. 51-66, 2011.

MEDRI, C. et al. O alagamento do solo afeta a sobrevivência, o crescimento e o metabolismo de *Aegiphila sellowiana* Cham. (*Lamiaceae*). **Semina: Ciências Biológicas e da Saúde**, v. 33, n. 1, p. 123-134, jan./jun. 2012.

MELGAREJO, M. A. et al. Características agronômicas da canola em diferentes espaçamentos entre linhas e densidades de plantas. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE CANOLA, 1., 2014, Passo Fundo/RS. **Anais...** Passo Fundo/RS: Embrapa Trigo, 2014. p. 1-5.

MELO, T. S. et al. Effect of the growing and soil management system on soybean establishment. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 18905-18912, fev., 2021.

MOUSAVI, J.; SAM-DALIRI M.; MOBASSER, M. R. Effect of planting row spacing on agronomic traits of winter canola cultivars (*Brassica napus* L.). **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 5, n. 10, p. 1290-1294, 2011.

MULVANEY, M. J. et al. *Brassica carinata* Seeding Rate and Row Spacing Effects on Morphology, Yield, and Oil. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 1, p. 528–535 mar., 2019.

MUSTROPH, A. Improving Flooding Tolerance of Crop Plants. **Agronomy**, v. 160, n. 8, p. 1-25, 2018.

NABLOUSSI, A. et al. Assessment of a set of rapeseed (*Brassica napus* L.) varieties under waterlogging stress at different plant growth stages. **Oilseeds and fats, Crops and Lipids**, v. 26, n. 36, p. 1-10, 2019.

NIED, A. H. **Parâmetros bioclimáticos e respostas da canola ao ambiente físico**. 2013. 136 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

PASHAKOLAEI, S. D.; SHAHNAZARI, L.; TALUKOLAEI, M. J. Investigation of canola yield as a second crop in paddy fields under subsurface drainage. **Journal of Water and Soil Conservation**, v. 24, n. 1, p. 237-249, 2017.

PERUZATTO, J. M. Z. et al. The Impact of Oxytocin Gene Knockout on Sexual Behavior and Gene Expression Related to Neuroendocrine Systems in the Brain of Female Mice. **Cellular and Molecular Neurobiology**, v. 37, n. 1, p. 803-815, 2017.

PLOSCHUK, R. A. et al. Waterlogging of Winter Crops at Early and Late Stages: Impacts on Leaf Physiology, Growth and Yield. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, n. 10, p. 1806, feb., 2020.

PLOSCHUK, R. A. et al. Waterlogging of winter crops at early stages: impacts on leaf physiology, growth and yield. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, n. 1863, p. 1-25, dez., 2018.

PLOSCHUK, R. A.; MIRALLES, D. J.; STRIKER, G. G. Early- And late-waterlogging differentially affect the yield of wheat, barley, oilseed rape and field pea through changes in leaf area index, radiation interception and radiation use efficiency. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n. 3, p. 504-520, 2021.

ROCHA, L. da. **Crescimento, desenvolvimento e produtividade de canola em solo com excesso hídrico natural**. 2018. 81 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

ROSSI, E. et al. Profundidade do lençol freático no cultivo de canola. **HOLOS**, v. 6, n. 31, p. 1-6, 2015.

SANTOS, C. J. O. G. et al. Efeito da desfolha na altura de plantas e produtividade de grãos de canola (*Brassica napus* L.). **Ciência Agrícola**, v. 18, n. 1, p. 11-19, 2020.

SHAHIN, Y.; VALIOLLAH, R. Effects of row spacing and sowing rates on some agronomical traits of spring canola (*Brassica napus* L.) cultivars. **Journal of Central European Agriculture**, v. 10, n. 2, p. 115-122, 2009.

SILVA, C. A. S.; PARFITT, J. M. B. **Drenagem Superficial para Diversificação do Uso dos Solos de Várzea do Rio Grande do Sul**. Embrapa Clima Temperado, n. 40, nov., 2004. (Circular técnico). Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/744941/1/Circular40.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2021.

SILVEIRA, H. R. de O. et al. Efeitos do excesso de água no crescimento de mudas de café (*Coffea arabica* L.). **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, n. 2, p. 211-218, 2014.

TARTAGLIA, F. de L. et al. Water excess in different phenological stages of canola cultivars. **African Journal of Agricultural Research**, v. 13, n. 45, p. 2563-2569, 2018.

TARTAGLIA, F. de L. **Respostas agronômicas e ecofisiológicas da cultura da canola ao excesso hídrico**. 2016. 97 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

TOMM, G. O. et al. **Desempenho de genótipos de canola (*Brassica napus* L.) no Nordeste do estado da Paraíba, Nordeste do Brasil**. 65. ed. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008. 15 p.

TOMM, G. O. et al. **Tecnologia para produção de canola no Rio Grande do Sul**. 113. Ed. Passo Fundo: Embrapa Trigo, p. 1-39, dez., 2009.

TOMM, G. O. **Indicativos tecnológicos para produção de canola no Rio Grande do Sul**. 4. ed. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2007. 68 p. (Embrapa Trigo. Sistemas de produção). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/canola/p_sp03_2007.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2021.

WOLLMER, A. C., PITANN, B.; MÜHLING, K. H. Waterlogging events during stem elongation or flowering affect yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.) but not seed quality. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 204, n. 1, p. 165–174, 2018.

XU, X.; NIEBER, J. L.; GUPTA, S. C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p.1743-1750, 1992.

XU, M. et al. The effect of waterlogging on yield and seed quality at the early flowering stage in *Brassica napus* L. **Field Crops Research**, v. 180, p. 238-245, ago., 2015.

ZAMAN, M. S. U. et al. Changes in gene expression during germination reveal pea genotypes with either “quiescence” or “escape” mechanisms of waterlogging tolerance. **Plant, Cell and Environment**. v. 42, n. 1, p. 245–258. 2019.

ZHOU, X. et al. A comparison of screening methods to identify waterlogging tolerance in the field in *Brassica napus* L. during plant ontogeny. **Plos One**, v. 9, n. 3, p. 1-9, 2014.

ZHU, J. K. Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants. **Cell**, v. 167, n. 2, p. 313-324, 2016.

ZOU, X. et al. The Transcriptome of *Brassica napus* L. Roots under Waterlogging at the Seedling Stage. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 14, n. 2, p. 2637-2651, jan., 2013.

ZOU, X. et al. A comparison of screening methods to identify waterlogging tolerance in the field in *Brassica napus* L. during plant ontogeny. **Plos One**, v. 9, n. 3, p. 1-9, 2014.

ZOU X. et al. Comparison of transcriptomes undergoing waterlogging at the seedling stage between tolerant and sensitive varieties of *Brassica napus* L. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 14, n. 9, p. 1723–1734, 2015.

5 DISCUSSÃO

O sucesso do cultivo de canola em ambientes com excesso hídrico no volume de solo ocupado pelas raízes está diretamente relacionado com o manejo do nível de elevação do lençol freático no solo e sua persistência. Em 2018, os 30 dias com restrição da camada aerada do solo em profundidade menor que 0,05 m no subperíodo de roseta e alongamento da haste da canola constituíram o período com maior duração em excesso hídrico no desenvolvimento da cultura nos dois ciclos produtivos avaliados. Tais condições, associadas aos demais períodos com menor intensidade da condição de hipóxia e/ou anóxica do solo, interferiram no crescimento, dinamismo de crescimento dos ramos laterais, expressão dos componentes de rendimento e produtividade da cultura.

As condições de hipoxia e anoxia no solo são muito prejudiciais no crescimento e desenvolvimento das plantas de canola, pois estão atrelados diretamente ao acúmulo de biomassa, expressão de caracteres produtivos e efeitos deletérios das alterações morfofisiológicas condicionadas na planta (LIU et al., 2020; SANTOS et al., 2020; XU et al., 2015; ZHU, 2016; ZOU et al., 2014). Camadas do solo com aeração inferiores a 0,20 m de profundidade foram considerados por Rossi et al. (2015) como já prejudiciais ao desenvolvimento de canola, mas quando a camada se restringiu a menos de 0,10 m, passou ser restritivo para o cultivo de canola. Para Tartaglia et al. (2018), 24 horas com alagamento do solo são suficientes para impactar negativamente no crescimento e na capacidade produtiva da cultura. Assim, a remoção mais acelerada do excesso de água, pelo menos da camada superficial do solo, é fundamental para diminuir o impacto negativo dessa condição ambiental deletéria resguardando a capacidade produtiva da cultura da canola (ROCHA, 2018; SANTOS et al., 2020).

O aumento do ciclo de desenvolvimento em 12,9%, diminuição da produtividade de grãos em 58,8% e índice de colheita inferior de 28,6% em 2019 na ausência da remoção excesso hídrico por drenos permite inferir a relação direta do efeito prejudicial da condição de alagamento para a canola. Assim, a utilização de drenagem superficial do solo por meio de sulcos superficiais de 0,25 m de profundidade no sistema de cultivo em terras baixas foi importante para promover a remoção mais acentuada do excesso de umidade da superfície do solo após eventos pluviométricos e a efetiva da elevação do lençol freático.

O aumento da zona aerada do solo em ambiente drenado condicionou à crescimento inicial maior e resultou em maior interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e coeficiente de extinção de RFA pelo dossel. Assim, o aumento na altura de planta, número de síliquas, grãos por síliqua e massa dos grãos em ambiente solo drenado superficialmente, podem ser reflexo do maior acúmulo de fotoassimilados na planta, potencializando a expressão de seus caracteres. Em 2018, em que a presença do excesso hídrico mais frequente se constituiu em maior intensidade na ocorrência, o uso de drenos favoreceu a expressão dos componentes AP, NSP, NGS, MMG em 22,0, 469,9, 130,8, 58,7%, respectivamente, quando comparado ao SD. A menor expressividade do NSP, também pode estar atrelado ao efeito deletério do excesso hídrico no ambiente sem drenagem, onde a abscisão de estruturas vegetativas e reprodutivas são condicionadas pelo aumento da concentração de etileno na planta (AHMED et al., 2013; SILVEIRA et al., 2014).

O dinamismo de emissão de ramos é outra característica importante associado ao direcionamento de energia pela planta. Em condições de excesso hídrico, onde ocorreu redução na capacidade de síntese de fotoassimilados em detrimento ao comprometimento do sistema radicular e menor interceptação da RFA, a necessidade da emissão de novas estruturas para contornar perdas associados aos efeitos deletérios. Assim, ocorre a limitação da disponibilidade de energia para o crescimento da planta, e principalmente, a expressão dos caracteres produtivos. O aumento da emissão de ramos de 21,7 para 62,1%, de 2018 para 2019 respectivamente, respalda o maior gasto de energia na emissão de ramos em ambientes sem a presença de drenagem superficial no cultivo de canola, quando comparado ao CD. Na análise da capacidade fotossintética em função da menor disponibilidade de RFA em 2018, associada a maior elevação do lençol freático durante o ciclo produtivo, torna ainda mais relevante a redução do direcionamento de energia para emissão de ramos laterais, especialmente de ramos terciários, que geralmente são pouco produtivos e apresentam defasagem na formação e enchimento de grãos, resultando em atraso na maturação em relação ao rácemo da haste principal (KRÜGER et al., 2011b; PIZOLOTTO et al., 2016; SILVA et al., 2011; ZHU, 2016).

O manejo com ajuste do arranjo espacial de plantas no dossel de canola é uma das alternativas a ser considerado para minimizar os impactos negativos do

excesso hídrico, e propiciar condições micrometeorológicas no dossel mais benéficas ao desenvolvimento da cultura, visando evitar a perda da capacidade produtiva. Neste sentido, a redução da competição intraespecífica na linha de semeadura no espaçamento 0,17 m resultou numa maior densidade final de plantas, o que acabou condicionando além de uma equidistância mais provável, uma maior eficiência de interceptação de RFA e coeficiente de extinção da RFA. O aumento da interação da planta com a RFA em linhas espaçadas em 0,17 m, pode ter favorecido a maior produção de fotoassimilados, diretamente relacionados ao aumento do número de grãos por síliqua. Em 2019, aliado as menores condições de excesso hídrico do solo, o espaçamento 0,17 m condicionou um maior rendimento de grãos da cultura. Esta resposta está de acordo com Chavarria et al. (2011), Krüger et al. (2011), e Bandeira, Chavarria e Tomm (2013), afirmam que plantas em espaçamentos entre linhas menores de 0,20 m apresentam melhores rendimentos de grãos em condições de melhor drenagem natural do excesso hídrico.

Na estimativa da eficiência de uso da RFA, a redução da densidade final de plantas, maior expansão do IAF e menor interceptação de RFA estão diretamente relacionados com o maior incremento de matéria seca por unidade de RFA interceptada (g MJ^{-1}) em espaçamentos superiores, como o de 0,68 m. O aumento de espaços vazios entre linhas de semeadura confere a planta maior necessidade de crescimento de suas partes vegetativas para fechar o dossel vegetal e aumentar a eficiência de interceptação de RFA (KRÜGER et al., 2017). Assim, espaçamentos maiores podem emitir mais folhas através dos novos ramos, mas demoram mais tempo para cobrir a superfície do solo (JUNIOR et al., 2018) e com isso interceptam menos RFA incidente.

O índice de área foliar também sofreu influência da alteração do espaçamento e condição ambiental de drenagem. Espaçamentos superiores apresentaram maior IAF máximo no ajuste do modelo, porém há necessidade térmica superior para esta condição em relação a menores espaçamentos. Este comportamento pode estar associado à maior e constante emissão de ramos laterais, principalmente na direção do espaço entre fileiras em resposta a abscisão de folhas, (em parte possivelmente por maior competição em um menor espaço entre plantas na fileira), flores e síliquas, onde novos apêndices caulinares surgem nestas estruturas, contribuindo para maior IAF, porém em condição fenológica mais avançada, em relação a haste e o rácemo principal de cada planta. A provável menor disponibilidade de fotoassimilados

presentes na planta em condição de competição intraespecífica mais intensa em espaçamentos maiores, pode limitar a capacidade de emissão de ramos. Assim, espaçamentos intermediários podem ser favorecidos na maior emissão de ramos laterais em condições de excesso hídrico do solo, tal como observado em SD em 2019 no espaçamento 0,45 m, com 6,4 ramos a mais em relação a melhor espaçamento em CD. Como consequência, outros caracteres podem ter sido influenciados pela emissão total de ramos, como o número de síliquas por planta (BARRERA-ROJAS et al., 2020; PLOSKHUK et al., 2018). Os espaçamentos entre fileiras de plantas de 0,48 e 0,43 m se constituíram o melhor arranjo de adaptação a condição ambiental, o que foi expressado pelo maior NSP, respectivamente, em 2018 e 2019.

Por fim, os resultados obtidos para o rendimento de grãos da cultura, com alta correlação positiva para os caracteres de produtividade, ressaltam que apesar do espaçamento 0,17 m apresentar maior produtividade em 2019, espaçamentos intermediários apresentam boa expressão nos componentes de rendimento da cultura, tornando-os como um manejo mais seguro para a inserção da cultura em ambientes com possibilidade de ocorrência de excesso hídrico do solo. Em 2018, a maior produtividade no espaçamento de 0,41 m em CD, aliado a espaçamentos de 0,43 a 0,48 m na expressão do NSP em 2018 e 2019, respectivamente, ressaltam a opção preferencial por utilização de espaçamentos intermediários.

Assim, o uso do espaçamento 0,45 m no cultivo da canola pode favorecer um crescimento e desenvolvimento mais adequado para obter bons rendimentos de grãos no cultivo da canola, sob drenagem superficial. Aliado a isso, a presença de maquinários com esta configuração do espaçamento no mercado de máquinas e propriedades rurais, torna a sua utilização mais acessível e prática aos produtores rurais.

A utilização de drenagem superficial do solo mostrou-se uma técnica eficaz no manejo de canola em terras baixas. Porém, existe uma grande variabilidade na condição de excesso hídrico do solo, ocasionada pela variabilidade natural dos solos, declividade e volume de precipitação pluviométrica. Assim, áreas onde já possuem resultados bons com o sistema arroz-soja, a cultura da canola apresenta maior possibilidade de sucesso em seu cultivo, principalmente após a colheita da cultura da soja.

Neste contexto, o sistema de rotação de culturas em ambientes de terras baixas com inserção de culturas de coxilha necessita ser analisado mais detalhadamente pela pesquisa, visto a grande variabilidade de resposta das culturas a modificação das condições ambientais as quais são sujeitas em seu cultivo agrícola.

6 CONCLUSÕES

A utilização de drenagem superficial do solo em terras baixas é relevante para uma futura expansão da cultura da canola para os sistemas produtivos de terras baixas.

A elevação do lençol freático até a superfície do solo é prejudicial à cultura da canola, sendo sua duração inversamente relacionada com a expressão dos caracteres de crescimento e produtividade da cultura.

O uso da drenagem superficial do solo com sulcos de 0,25 m no espaçamento de 10,0 por 8,5 m é eficiente para remoção do excesso de água superficial e subsuperficial do solo.

A redução do espaçamento entre linhas de semeadura aumenta a capacidade de interceptação e o coeficiente de extinção da radiação fotossinteticamente ativa.

O índice de área foliar da cultura da canola é afetado pela maior emissão de ramos laterais em condição de excesso hídrico do solo.

Em solos com excesso hídrico a canola necessita maior acúmulo térmico para a emissão do IAF máximo, porém sua longevidade é reduzida.

A ausência de drenagem superficial em ambientes com excesso hídrico do solo favorece a maior emissão de ramos laterais na cultura da canola, principalmente de ramos terciários, com maior incremento no espaçamento 0,68 m. No entanto, é nos espaçamentos intermediários de cerca de 0,45 m entre fileiras de plantas que se obtém melhor expressão do número de síliquas por planta e produtividade de grãos em solos com elevação do lençol freático até a superfície do solo.

O não uso de drenagem superficial do solo diminui a altura de planta.

A falta de drenagem superficial diminui a produção de síliquas, grãos por síliqua e massa dos grãos, condicionando menor produtividade de grãos de canola.

O número de síliquas e de grãos por planta apresentam alta correlação positiva com a produtividade de grãos de canola em terras baixas sujeitas a períodos de excesso hídrico.

O aumento do número de ramos laterais correlaciona-se fortemente com a presença de excesso hídrico no cultivo de canola.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, F. et al. Waterlogging tolerance of crops: breeding, mechanism of tolerance, moleculares approaches, and future prospects. **BioMed Research International**, v. 1, n. 1. p. 1-10, 2013.

AHMED, M. et al. Potato Modeling. **Systems Modeling**, v.14, n. 1, p.383-401, 2020.

ANGADI, S. V. et al. Yield Adjustment by Canola Grown at Different Plant Populations under Semiarid Conditions. **Crop Science**, v. 43, n. 4., p. 1358-1366, 2003.

BANDEIRA, T. P.; CHAVARRIA, G.; TOMM, G. O. Desempenho agrônômico de canola em diferentes espaçamentos entre linhas e densidades de plantas. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, v. 48, n. 10, p. 1332-1341, out., 2013.

BARRERA-ROJAS, C. H. et al. MiR156-targeted SPL10 controls Arabidopsis root meristem activity and root-derived de novo shoot regeneration via cytokinin responses. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 3, p. 934-950, jan., 2020.

BATISTA-SILVA, W. et al. Modulation of auxin signalling through DIAGETROPICA and ENTIRE differentially affects tomato plant growth via changes in photosynthetic and mitochondrial metabolism. **Plant Cell and Environment**, v. 42, n. 2, p. 448-465, fev., 2019.

BATTISTI, R. et al. Dinâmica floral e abortamento de flores em híbridos de canola e mostarda castanha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 2, p. 174-181, 2013.

BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J.I. **As Plantas e o Clima** - Princípios e aplicações. 1. ed. Guaíba: Agrolivros, 2017. 351 p.

BORTOLUZZI, M. P. et al. Risk of water surplus in soybean crop on haplic planosol soil in the Central Depression of Rio Grande do Sul State, Brazil. **Ciência Rural**, v. 47, n. 2, p. 1-7, 2017.

BORTOLUZZI, M. P. **Probabilidade de ocorrência de excesso hídrico para a cultura da soja em planossolos da região central do Rio Grande do Sul**. 2015. 88 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

BRAND, S. I. et al. Severity of Septoria Leaf Spot and Sunflower Yield Due to Leaf Wetness Duration. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, 10, p.178-188; 2018.

BRANDLER, D. **Interferência e nível de dano econômico de plantas daninhas na cultura da canola**. 2019. 77 p. Dissertação (mestrado em ciência e tecnologia ambiental) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 2019.

CANOLA COUNCIL OF CANADA. **History of Canola Seed Development**. Canola Encyclopedia, Winnipeg, 20 jul. 2021. Disponível em: <<https://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/history-of-canola-seed-development/>>. Acesso em: 20 jul. 2021.

CASAROLI, D. et al. Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura de soja. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**, v. 14, n. 2, p. 102-120, 2007.

CHAVARRIA, G. et al. Índice de área foliar em canola cultivada sob variações de espaçamento e de densidade de semeadura. **Ciência Rural**, v. 41, n. 12, p. 2084-2089, 2011.

CONAB. Safra - **Estimativa de Evolução de Grãos**. Brasília, 31 jun. 2021. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>>. Acesso em: 31 jun. 2021.

CONCENÇO, G. et al. Semeadura direta de arroz em resteva de soja cultivada no sistema sulco-camalhão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 13221-13231, mar., 2020.

DALMAGO, G. A. et al. Aclimação ao frio e dano por geada em canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 9, p. 933-943, 2010.

DALMAGO, G. A. et al. **Potencial de aplicação da Agrometeorologia em agricultura de precisão para a produção de grãos**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2015. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/116173/1/2014-LV-agricultura-de-precisao-p331.pdf>>. Acesso em: 21 jan. 2021.

DALMAGO, G. A. et al. Use of solar radiation in the improvement of spring canola (*Brassica napus* L., Brassicaceae) yield influenced by nitrogen topdressing fertilization. **Agrometeoros**, v. 26, n. 1, p. 223-237, 2018.

DALMAGO, G. A. et al. Canola. In: MONTEIRO, J. E. (Coord.) **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. 1. ed. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009. cap. 8, p. 133-149.

DE MORI, C.; TOMM, G. O.; FERREIRA, P. E. P. **Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da canola no mundo e no Brasil**. 149. ed. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2014. 36 p. (Embrapa Trigo. Documentos online, 149). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do149.htm>. Acesso em: 20 jul. 2021.

DOGAN, E. et al. Supplemental irrigation effect on canola yield components under semiarid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 9, p. 1403-1408, 2011.

DURIGON, A.; VAN LIER, Q. D. J. Duração do período de molhamento foliar: Medição e estimativa em feijão sob diferentes tratamentos hídricos. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 200-207, 2013.

EDWARDS, J.; HERTEL, K. **Canola growth and development**. 2011. Disponível em: <<http://www.dpi.nsw.gov.au/aboutus/resources/bookshop/canologrowthanddevelopment>>. Acesso em: 30 mar. 2021.

EDWARDS, J.; JENSEN, B. **Canola growth e development**. New South Wales: Department of Primary Industries, 2011. 89 p.

ESTEVEZ, R. L. et al. A cultura da canola (*Brassica napus* var. *oleifera*). **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 13, n. 1, p. 1-9, jan./mar., 2014.

FAO. **Food Outlook** – Biannual Report on Global Food Markets. Roma, jun. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.4060/cb4479en>>. Acesso em: 25 jul. 2021.

FIEBELKORN, Danielle; RAHMAN, Mukhlesur. Desenvolvimento de um protocolo para avaliação da tolerância à geada em colmada/canola (*Brassica napus* L.). **The Crop Journal**, v. 4, n. 2, p. 147-152, 2016.

FOCHESATTO, E. et al. Influência de variáveis ambientais no acúmulo de graus dia em canola. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE CANOLA, 1., 2014, Passo Fundo. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa, 2014. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/140348/1/ID43585-2014SLACPoster25.pdf>>. Acesso em 20 jun. 2021

FONTANA, D. C. et al. Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela cultura da soja através de dados do sensor Modis. **Bragantia**, v. 71, n. 2, p. 563-571, 2012.

FONTANA, D. C. et al. NDVI e alguns fatores de variabilidade. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., Santos, SP. **Anais...** Santos: UNISANTOS, SP, 2019.

FONTOURA JUNIOR, J. A. S. da et al. Simulação de diferentes arranjos de sistemas integrados em áreas de várzea. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p.63059-63077, aug., 2020.

FORAJI, A. et al. Seed yield and water use efficiency of canola (*Brassica napus* L.) as affected by high temperature stress and supplemental irrigation. **Journal Agricultural Water Management**, v. 96, n. 1, p. 132-140, 2009.

GAMALERO E.; GLICK B. R. Tolerância ao estresse etileno e abiótico nas plantas. In: ADAPTAÇÕES AMBIENTAIS E TOLERÂNCIA AO ESTRESSE DAS PLANTAS NA ERA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS. 2012, Nova Iorque/NY. **Anais...** Nova Iorque/NY: Springer, 2012. P. 1-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0815-4_18. 978-1-4614-0814-7>. Acesso em: 15 mai. 2021

GAN, Y. T. et al. Root mass for oilseed and pulse crops: Growth and distribution in the soil profile. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 89, n. 5, p. 883-893, 2009.

GARCÍA, E. R. **Manual de producción canola**. 1. ed. Puebla: Secretaria de Desarrollo Rural Del Estado de Puebla, 2007. 152 p.

GIBBS, J.; GREENWAY, H. Review: Mechanisms of anoxia tolerance in plants. I. Growth, survival and anaerobic catabolism. **Functional Plant Biology**, v. 30, n. 1, p. 1-47, 2003.

GODIN, C. Representing and encoding plant architecture: a review. **Annals of Forest Science**, v. 57, n. 5, p. 413-438, 2000.

GOULART, F. D. A. P. et al. Rotação de cultura e preparo do solo sobre o banco de sementes de plantas daninhas em terras baixas. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 18, n. 1, p. 1-7, 2020.

GOULART, R. Z.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F. Cropping poorly-drained lowland soils: alternative to rice monoculture, their challenges and management strategies. **Agricultural Systems**, v. 177, n. 1, p. 1-15, 2020.

GULARTE, J. A.; MACEDO, V. G. K.; PANOZZO, L. E. Produção e mercado de sementes de canola no Brasil. **Applied Research e Agrotechnology**, v. 13, n. 1, p. 1-9, 2020.

GULDEN, R. H.; WARWICK, S. I.; THOMAS, A. G. The biology of Canadian Weeds: *Brassica napus* L. and *B. rapa* L. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 88, n. 5, p. 951-996, 2008.

GUO, Y. et al. Effects of waterlogging stress on early seedling development and transcriptomic responses in *Brassica napus*. **Molecular Breeding**, v. 40, n. 85, p. 1-15, 2020.

HABIBZADEH, F. et al. Alleviation of waterlogging damage by foliar application of nitrogen compounds and tricyclazole in canola. **Australian Journal of Crop Science**, v. 7, n. 3, p. 401-406, 2013.

HOPPMANN, D.; WITTICH, K.-P. Epidemiology-related modelling of the leaf-wetness duration as an alternative to measurements, taking *Plasmopara viticola* as an example. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 104, n. 6, p. 533-544, 1997.

IRIARTE, L. B.; VALETTI, O. E. **Cultivo de Colza**. 1. ed. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuária – INTA, 2008. 156 p.

JACOB JUNIOR, E.A. et al. Changes in canola plant architecture and seed physiological quality in response to different sowing densities. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 34, n. 1, p. 14 - 20, 2012.

JAN, S. A. et al. Impact of salt, drought, heat and frost stresses on morpho-biochemical and physiological properties of *Brassica* species: An updated review. **Journal of Rural Development and Agriculture**, v. 2, n. 1, p. 1-10, 2017.

JUNIOR, A. A. B. et al. Phenotypic plasticity in a soybean cultivar with indeterminate growth type. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 53, n. 9, p.1038-1044, sept., 2018.

JUNK, W. J. Wetlands of tropical South America. In: WETLANDS OF THE WORLD. 1. 1993, Boston, CA. **Anais...** Boston: Lancaster, 1993. p. 679-739.

KAMKAR, B. et al. The effects of irrigation regimes and nitrogen rates on some agronomic traits of canola under a semiarid environment. **Agricultural Water Management**. v. 98, n. 1, p. 1005–1012, 2011.

KIRKEGAARD, J. A. et al. The critical period for yield and quality determination in canola (*Brassica napus* L.). **Field Crops Research**, v. 222, n. 1, p. 180-188, jun., 2018.

KOVALESKI, S. **Caracterização, quantificação e modelagem de danos provocados pela geada no período reprodutivo da canola**. 2019. 208 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

KOVALESKI, S. **Effects of frost in canola (*Brassica napus* L.) depending on the straw distribution in soil surface**. 2015. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

KOVALESKI, S. et al. Frost damage to canola (*Brassica napus* L.) during reproductive phase in a controlled environment. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 27, n. 2, p.397-407, dez., 2019.

KOVALESKI, S. et al. Soil-Surface Straw Influences Micrometeorological Conditions Affecting Canola Mortality During Nighttime Frosts. **Journal of Agricultural Science**, v. 12, n. 11, p. 246-259, 2020.

KOZLOWSKI, T. T. Plant Responses to Flooding of Soil. **BioScience**, v. 34, n. 3, p. 162–167, 1984. Disponível em: <www.jstor.org/stable/1309751>. Acesso em: 23 jun. 2021.

KREUZWIESER, J.; PAPADOPOULOU, E.; RENNENBERG, H. Interaction of flooding with carbon metabolism of forest trees. **Plant Biology**, v. 6, n. 1, p. 299-306, 2004.

KRÜGER, C. A. M. B. **Arranjo de plantas e seus efeitos na produtividade de grãos e teor de óleo em canola**. 2011. 89 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

KRÜGER, C. A. M. B. et al. Arranjo de plantas na expressão dos componentes de produtividade de grãos de canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 1, p. 1448-1453, 2011a.

KRÜGER, C. A. M. B. et al. Herdabilidade e correlação fenotípica de caracteres relacionados à produtividade de grãos e à morfologia da canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 12, p. 1625-1632, dez., 2011b.

KRÜGER, C. A. M. B. et al. Relações de variáveis ambientais e subperíodos na produtividade e teor de óleo em canola. **Ciência Rural**, v. 44, n. 9, p. 1671-1677, set., 2014.

KRÜGER, C. A. M. B. Interceptação da radiação fotossinteticamente ativa por canola em distintas condições de cultivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 20., 2017, Juazeiro/CE. **Anais...** Juazeiro/CE: Embrapa Semiárido, 201., p. 1-5.

KUAI, J. et al. The yield of mechanically harvested rapeseed (*Brassica napus* L.) can be increased by optimum plant density and row spacing. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 18821-18835, 2015.

KUNZ, J. H. et al. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 11, p. 1511-1520, 2007.

LIU, C.; GAN, Y.; POPPY, L. Evaluation of on-farm crop management decisions on canola productivity. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 94, v. 1, p. 131-139, 2014.

LIU, L. et al. Fine root distributions in oilseed and pulse crops. **Crop Science**, v. 50, n. 1, p. 222- 226, 2010.

LIU, M. et al. Properties of root water transport in canola (*Brassica napus*) subjected to waterlogging at the seedling, flowering and podding growth stages. **Plant Soil**, v. 454, p. 431–445, 2020.

LIU, T.; WANG, Z.; CAI, G. Canopy Apparent Photosynthetic Characteristics and Yield of Two Spike-Type Wheat Cultivars in Response to Row Spacing under High Plant Density. **PLoS ONE**, v. 11, n. 2, p. 1-16, 2016.

LUO, T. et al. Associating transcriptional regulation for rapid germination of rapeseed (*Brassica napus* L.) under low temperature stress through weighted gene co-expression network analysis. **Scientific Reports**, v. 9, n. 55, p. 1-15, 2019.

LUZ, G. L. et al. Temperatura base inferior e ciclo de híbridos de canola. **Ciência Rural**, v. 42, n. 9, p. 1549-1555, set., 2012.

MARCUZZO, L. L.; REIS, E. M. Modelo climático para previsão do míldio da cebola. **Summa Phytopathologica**, v. 42, n. 1, p. 103-104, 2016.

MICUANSKI, V. C. et al. A cultura energética - canola (*Brassica napus* L.). **Acta Iguazu**, v. 3, n. 2. p. 141-149, 2014.

MIURA, A.K. et al. **Discriminação e Delimitação das Terras Baixas no Estado do Rio Grande do Sul**: Primeira Aproximação. 313. ed. Pelotas: EMBRAPA, Comunicado Técnico, 2015, 12 p.

MOHAMMADI, K.; ROKHZADI, A. An integrated fertilization system of canola (*Brassica napus* L.) production under different crop rotations. **Industrial Crops and Products**, v. 37, n. 1, p. 264-269, 2012.

MONTEITH, J. L. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 68, n. 1, p. 213-220, 1994.

MÜLLER, M. **Arquitetura de plantas: Interceptação de radiação solar, deposição de produtos fitossanitários e produtividade**. 2017. 91 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2017.

NABLOUSSI, A. et al. Assessment of a set of rapeseed (*Brassica napus* L.) varieties under waterlogging stress at different plant growth stages. **Oilseeds and fats, Crops and Lipids**, v. 26, n. 36, p. 1-10, 2019.

NIED, A. H. **Parâmetros bioclimáticos e respostas da canola ao ambiente físico**. 2013. 136 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

PARFITT, J. M. B. et al. **Modelos para sistematização nas terras baixas do Rio Grande do Sul**. 498. ed. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2020. 22 p. (Documentos: Embrapa Clima Temperado).

PASINATO, A. et al. Zoneamento agrícola de risco climático e épocas de semeadura. In: CULTIVO DE CANOLA. 3., 2014, Passo Fundo, RS. **Anais...** Passo Fundo, RS: Embrapa Trigo, Sistema de Produção, 2014. p. 1-10.

PERBONI, A. T. **Estresses abióticos em híbridos de canola: Efeito do alagamento e de baixas temperaturas**. 2011. 53 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.

PERUZATTO, J. M. Z. et al. The Impact of Oxytocin Gene Knockout on Sexual Behavior and Gene Expression Related to Neuroendocrine Systems in the Brain of Female Mice. **Cellular and Molecular Neurobiology**, v. 37, n. 1, p. 803-815, 2017.

PETTER, F. A. et al. Elevada densidade de semeadura aumenta a produtividade da soja? Respostas da radiação fotossinteticamente ativa. **Bragantia**, v. 75, n. 2, abr-jun., 2016.

PILAU, F. G.; ANGELOCCI, L. R. Área da Folha e Interceptação de Radiação Solar por Orange Tree Top. **Bragantia**, v. 74, n. 1, p. 476-482, 2015.

PIZOLOTTO, C. A. et al. Manejo da colheita de canola com dessecação e corte-enleiramento combinados a adesivante. **Acta Iguazu**, v. 6, n. 2, p. 81-97, 2017.

PLOSCHUK, R. A. et al. Waterlogging of Winter Crops at Early and Late Stages: Impacts on Leaf Physiology, Growth and Yield. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, n. 10. p. 1806-1815, fev., 2020.

PLOSCHUK, R. A. et al. Waterlogging of winter crops at early stages: impacts on leaf physiology, growth and yield. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, n. 1863, p. 1-25, dez., 2018.

PLOSCHUK, R. A.; MIRALLES, D. J.; STRIKER, G. G. Early- And late-waterlogging differentially affect the yield of wheat, barley, oilseed rape and field pea through changes in leaf area index, radiation interception and radiation use efficiency. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n. 3, p. 504-520, 2021.

PONNAMPERUMA, F. N. A Química dos Solos Submersos. **Avanços na Agronomia**, v. 24, n. 1, p. 29-96, 1972.

RADONS, S. Z. et al. Climate risk of Asian soybean rust occurrence in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Tropical Plant pathology**, v 1, n. 1, p. 1-8, 2021.

RAMBO, L. et al. Rendimento de grãos de soja em função do arranjo de plantas. **Ciência Rural**, v. 33, n. 1, p. 405-411, 2003.

ROCHA, L. da. **Crescimento, desenvolvimento e produtividade de canola em solo com excesso hídrico natural**. 2018. 81 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

RONDANINI, D. P. et al. Vegetative plasticity and floral branching compensate low plant density in modern spring rapeseed. **Field Crops Research**, v. 210, n. 1, p. 104-113, ago., 2017.

ROSSI, E. et al. Profundidade do lençol freático no cultivo de canola. **HOLOS**, v. 6, n. 31, p. 1-6, 2015.

SAATH, K. C. de O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n. 2, p. 154-156, abr./jun., 2018.

SANTOS, C. J. O. G. et al. Efeito da desfolha na altura de plantas e produtividade de grãos de canola (*Brassica napus* L.). **Ciência Agrícola**, v. 18, n. 1, p. 11-19, 2020.

SANTOS, H. P. dos; LHANBY, J. C. B.; DIAS, J. C. A. Efeito do espaçamento e da densidade de semeadura sobre o comportamento agrônômico da colza. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 5, p. 701-707, 1990.

SHAHIN, Y.; VALIOLLAH, R. Effects of row spacing and seeding rates on some agronomical traits of spring canola (*Brassica napus* L.) cultivars. **Journal of Central European Agriculture**, v. 10, n. 1, p. 115-122, 2009.

SHARAFIZADEH, M. et al. Effect of planting date and planting pattern on quality and quantity yield of canola hybrid seed (hayola 401). **Advances in Environmental Biology**, v. 1, n. 1, p. 2184-2196, jun., 2012.

SHARGHI, Y.; BAGHERI, H. Review of Morphology and Biologic in Canola (*Brassica napus* L.). **Research Journal of Fisheries and Hydrobiology**, v. 6, n. 4, p. 608-610, 2011.

SHROYER, J. P. **Soybean morphological characters and yield components as influenced by growth type, row spacing, population and planting date**. 1980. 187 p. Dissertation (Doctor of Philosophy) – Iowa State University, Iowa, 1980.

SILVA, C. A. S.; PARFITT, J. M. B. **Drenagem Superficial para Diversificação do Uso dos Solos de Várzea do Rio Grande do Sul**. 40. ed. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, nov., 2004. (Circular técnico). Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/744941/1/Circular40.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2021.

SILVA, J. A. G. et al. Dessecação em pré-colheita como estratégia de manejo na redução de perdas por fatores de ambiente em canola. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 17, n. 1, p.15-24, 2011.

SILVEIRA, G. et al. Efeito da densidade de semeadura e potencial de afilamento sobre a adaptabilidade e estabilidade em trigo. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 63-70, 2010.

SILVEIRA, H. R. de O. et al. Efeitos do excesso de água no crescimento de mudas de café (*Coffea arabica* L.). **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, n. 2, p. 211-218, 2014.

SOUZA FILHO, J. R. de. **Projeto, construção e levantamento de desempenho de um concentrador solar cilíndrico parabólico com mecanismo automático e rastreamento solar**. 2008. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

STRIEDER, M. L. et al. Crop management systems and maize grain yield under narrow row spacing. **Scientia Agrícola**, v. 65, n. 4, p. 346-353, 2008.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. Ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017. 888 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**. 5 ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918 p.

TARTAGLIA, F. de L. et al. Water excess in different phenological stages of canola cultivars. **African Journal of Agricultural Research**, v. 13, n. 45, p. 2563-2569. 2018.

TARTAGLIA, F. de L. **Respostas agronômicas e ecofisiológicas da cultura da canola ao excesso hídrico**. 2016. 97 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

TAZZO, I. F. et al. Variação vertical da temperatura do ar no dossel de plantas de batata. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 5, p. 486-492, 2008.

THOMAS, P. **The growers' manual**: Canola Council of Canada. 2014. Disponível em: <<http://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/cropestablishment/environmental-effects/>>. Acesso em: 15 abr. 2021

TOMM, G. O. et al. **Desempenho de genótipos de canola (*Brassica napus* L.) no Nordeste do estado da Paraíba, Nordeste do Brasil**. 65. ed. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008. 15 p. (Embrapa Trigo. Boletim de pesquisa e desenvolvimento).

TOMM, G. O. et al. **Tecnologia para produção de canola no Rio Grande do Sul**. 113. ed. Passo Fundo: Embrapa Trigo. p. 1-39, dez, 2009. (Documentos online). ISSN 1518-6512.e

TOMM, G. O. **Indicativos tecnológicos para produção de canola no Rio Grande do Sul**. Embrapa Trigo: 4. ed. Passo Fundo, 2007. 68 p. (Embrapa Trigo. Sistemas de produção). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/canola/p_sp03_2007.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2021.

TOURINO, M. C. C. et al. Espaçamento, densidade e uniformidade de semeadura na produtividade e características agronômicas da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 1, p. 1071-1077, 2002.

TRENTIN, G. et al. Controle da requeima em batata cv. 'Asterix' como base para modelos de previsão da doença. **Ciencia Rural**, v. 39, n. 2, p 393-399, 2009.

UHRY, Darci.; SILVA, Paulo Régis da. **Rotação em terras baixas**: uma lavoura à parte. A Granja. Porto Alegre, 31 out. 2019. Disponível em: <<https://irga.rs.gov.br/artigo>>. Acesso em: 01 ago. 2021.

VOLPE, J. **Neurobiology of the newborn**. 5 ed. Saunders, Philadelphia, 2008, 345 p.

WINKLER, A. S. et al. Surface drainage in leveled land: Implication of slope. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 22, n. 1, p. 77-82, 2018.

WOLLMER, A. C., PITANN, B.; MÜHLING, K. H. Waterlogging events during stem elongation or flowering affect yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.) but not seed quality. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 204, n. 1, p. 165–174, 2018.

XIN, H. et al. Comparative Transcriptome Analyses Revealed Conserved and Novel Responses to Cold and Freezing Stress in *Brassica napus* L. **Genes|Genomes|Genetics**, v. 9, n. 8, p. 2723-2737 ago., 2019.

XU, M. et al. The effect of waterlogging on yield and seed quality at the early flowering stage in *Brassica napus* L. **Field Crops Research**, v. 180, n. 1, p. 238-245, 2015.

YAN, I. et al. Physiological and molecular responses to cold stress in rapeseed (*Brassica napus* L.). **Journal of Integrative Agriculture**, v. 18, n. 12, p. 2742-2752, dez., 2019.

ZAMAN, M. S. U. et al. Changes in gene expression during germination reveal pea genotypes with either “quiescence” or “escape” mechanisms of waterlogging tolerance. **Plant, Cell and Environment**. v. 42, n. 1, p. 245–258, 2019.

ZHANG, J. et al. Responses of canola (*Brassica napus* L.) cultivars under contrasting temperature regimes during early seedling growth stage as revealed by multiple physiological criteria. **Acta Physiology Plant**, v. 37, n. 7, p. 1-15, 2015.

ZHOU, W. et al. Plant waterlogging/flooding stress responses: From seed germination to maturation. **Plant Physiology Biochem**, v. 148, n. 1, p. 228-236, mar., 2020.

ZHOU, W.; LIN, X. Effects of waterlogging at different growth stages on physiological characteristics and seed yield of winter rape (*Brassica napus* L.). **Field Crops Research**, v. 44, n. 2, p. 103-110, dez., 1995.

ZHOU, X. et al. A comparison of screening methods to identify waterlogging tolerance in the field in *Brassica napus* L. during plant ontogeny. **Plos One**, v. 9, n. 3, p. 1-9, 2014.

ZHU, J. K. Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants. **Cell**, v. 167, n. 2, p. 313-324, 2016.

ZOU X. et al. Comparison of transcriptomes undergoing waterlogging at the seedling stage between tolerant and sensitive varieties of *Brassica napus* L. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 14, n. 9, p. 1723–1734, 2015.

ZOU, X. et al. A comparison of screening methods to identify waterlogging tolerance in the field in *Brassica napus* L. during plant ontogeny. **Plos One**, v. 9, n. 3, p. 1-9, 2014.

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO

Caracterização química do solo na camada 0-0,20 m utilizado para o cultivo da canola cultivar Diamond nos anos 2018 e 2019 em ambiente de terras baixas com presença de elevação do lençol freático. Santa maria, RS, 2021

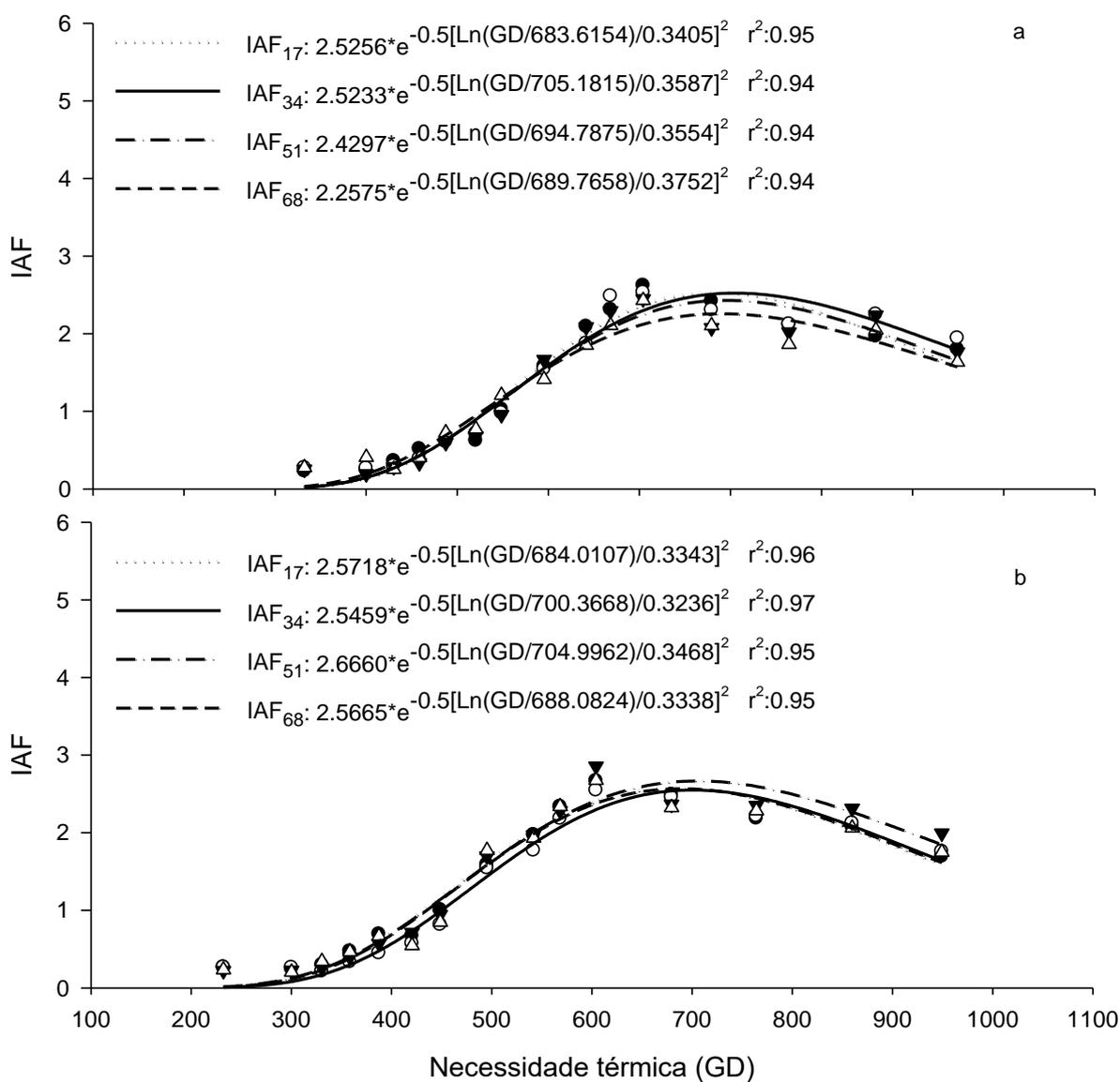
Ciclo de cultivo	pH água	M.O. %	Argila %	P - -mg dm ⁻³ -	K	Ca - -	Mg -cmol _c dm ⁻³ -	Al - - -
2018	4.9	2.9	31	14.3	64	7.3	4.1	1.4
2019	5.6	2.5	29	15.4	116	9.4	4.0	0.0

M.O.: Matéria orgânica; P: Fósforo; K: Potássio, Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; Al: Alumínio.

Fonte: Autor.

APÊNDICE B – MODELO DE AJUSTE NÃO LINEAR PARA IAF EM 2018

Modelos de ajuste não linear do índice de área foliar (IAF) em função do acúmulo térmico (graus-dia) para os diferentes espaçamentos em ambiente com (a) e sem drenagem superficial do solo (b) para o ciclo de cultivo em 2018. Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

APÊNDICE C – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON PARA DISTINTOS CARACTERES EM CANOLA EM DIFERENTES ANOS

Coeficientes de correlação de Pearson para caracteres de crescimento e produtividade da cultura da canola no cultivo em terras baixas na depressão central do Rio Grande do Sul em 2018 e 2019. Santa Maria, RS, 2021

Caractere	PROD	AP	DP	NSP	NGS	MMG	NRS	NRT	NRQ	NTR	IC
PROD	1	0.86**	0.52**	0.98**	0.95**	0.83**	-0.77**	-0.50**	-0.52**	-0.65**	0.97**
AP		1	0.47**	0.86**	0.86**	0.66**	-0.73**	-0.32	-0.35	-0.48	0.83**
DP			1	0.44*	0.61**	0.52**	-0.26	-0.30	-0.58**	-0.49*	0.54*
NSP				1	0.91**	0.80**	-0.75**	-0.49*	-0.45*	-0.61**	0.97**
NGS					1	0.81**	-0.83**	-0.60**	-0.55**	-0.72**	0.93**
MMG						1	-0.62**	-0.47**	-0.43*	-0.56**	0.82**
NRS							1	0.62**	0.50**	0.74**	-0.75**
NRT								1	0.56*	0.87**	-0.54**
NRQ		2018							1	0.88**	-0.53
NTR										1	-0.67
IC											1
PROD	1	0.96**	-0.15	0.86**	0.87**	0.75**	0.64**	-0.87**	-0.76**	-0.81**	0.86**
AP		1	-0.05	0.84**	0.87**	0.72**	0.60	-0.89**	-0.77**	-0.84**	0.85**
DP			1	-0.35*	0.16	-0.04	-0.16	0.11	0.22	0.12	-0.19
NSP				1	0.71**	0.58**	0.66**	-0.71**	-0.60**	-0.63**	0.83**
NGS					1	0.73**	0.51**	-0.85**	-0.73**	-0.81**	0.70**
MMG						1	0.50**	-0.70**	-0.69**	-0.67**	0.64**
NRS							1	-0.49*	-0.35	-0.34	0.62**
NRT								1	0.90**	0.98**	-0.70**
NRQ		2019							1	0.94**	-0.61**
NTR										1	-0.64**
IC											1

PROD: Produtividade de grãos; AP: Altura de planta; DP: Densidade de planta; NSP: Número de síliquas por planta; NGS: Número de grãos por síliqua; MMG: Massa de mil grãos; NRS: Número de ramos secundários; NRT: Número de ramos terciários; NRQ: Número de ramos quaternários; NTR: Número total de ramos e IC: Índice de colheita. Significativo pelo teste t, a 1% (**) e 5% (*) de probabilidade.

Fonte: Autor.

PROD: Produtividade de grãos; AP: Altura de planta; DP: Densidade de planta; NSP: Número de síliquas por planta; NGS: Número de grãos por síliqua; MMG: Massa de mil grãos; NRS: Número de ramos secundários; NRT: Número de ramos terciários; NRQ: Número de ramos quaternários; NTR: Número total de ramos e IC: Índice de colheita. Significativo pelo teste t, a 1% (**) e 5% (*) de probabilidade.

Fonte: Autor.

APÊNDICE E – QUADRO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS CARACTERÍSTICAS NAS SAFRAS 2018 E 2019

Quadrado médio do erro para altura de planta (AP, m), número de ramos secundários (NRS, ramos planta⁻¹), número de ramos terciários (NRT, ramos planta⁻¹), número de ramos quaternários (NRQ, ramos planta⁻¹), densidade de plantas (DP, plantas m⁻²), número de síliquas por planta (NSP), número de grãos por síliqua (NGS), massa de mil grãos (MMG, g) e produtividade de grãos de canola (PROD, kg ha⁻¹) nas safras 2018 e 2019. Santa Maria, RS, 2021

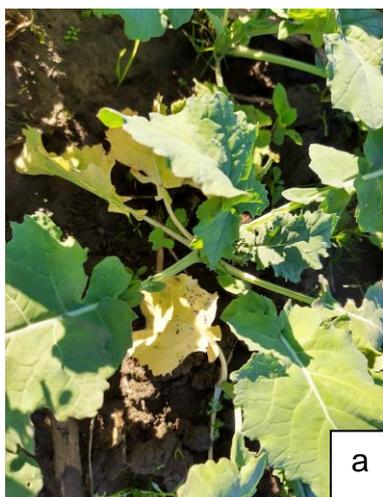
FV	GL	QUADRADOS MÉDIOS								
		AP	NRS	NRT	NRQ	DP	NSP	NGS	MMG	PROD
2018										
BLOCO	3	0.001	0.146	1.509	0.439	0.621	75.58	0.392	0.237	366
DRENO	1	0.259 **	8.101 **	18.05	18.911 *	330.814 **	68545.61 **	554.761 **	20.869 **	7600495 **
Erro 1	3	0.022	0.069	3.299	1.451	0.617	14.82	0.304	0.251	203
ESP	3	0.007	0.0540	0.6760	5.932 *	284.261 **	1324.75 **	5.556 **	0.479	92328 **
D x ESP	3	0.006	0.985 **	3.761 *	2.6	16.464 **	1195.00 **	2.999 **	0.155	57701 **
Erro 2	18	0.045	0.063	0.881	1.988	0.873	32.63	0.554	0.325	2494
Média geral		0.97	5.61	8.69	5.38	32.84	65.99	9.88	3.54	568.75
CV1 (%)		7.57	4.68	20.89	22.36	2.39	5.84	5.58	14.12	2.51
CV2 (%)		4.12	4.48	10.79	26.17	2.85	8.66	7.53	16.08	8.78
2019										
BLOCO	3	0.006	0.015	0.197	0.003	1.405	600.450	1.308	0.009	3130
DRENO	1	12.656 **	2.469 **	138.875 **	7.884 **	25.187 **	58481.99 **	186.421 **	1.834 *	19463700 **
Erro 1	3	0.022	0.021	0.251	0.003	0.562	255.570	2.075	0.056	20388
ESP	3	0.184 **	0.197	5.016 **	0.662 **	137.143 **	1588.43 **	11.039 **	0.026	22968
D x ESP	3	0.157	0.038	5.039 **	0.662 **	8.348 **	519.990	3.311 **	0.039	85822 **
Erro 2	18	0.122	0.168	0.174	0.049	0.923	246.360	0.622	0.060	12503
Média geral		1.1	4.3	4.0	0.5	35.3	124.6	19.4	3.9	1897.7
CV1 (%)		4.3	3.3	12.4	10.9	2.1	12.8	7.4	6.1	7.5
CV2 (%)		3.1	9.5	10.3	15.0	2.7	12.6	4.1	6.4	5.9

Fonte de variação (FV); Graus de liberdade (GL); Interação Dreno x Espaçamento (DxESP); Coeficiente de variação (CV); Significativo a 5 e 1% de probabilidade (* e **, respectivamente).

Fonte: Autor.

APÊNDICE F – EFEITOS DELETÉRIOS DO EXCESSO HÍDRICO DO SOLO

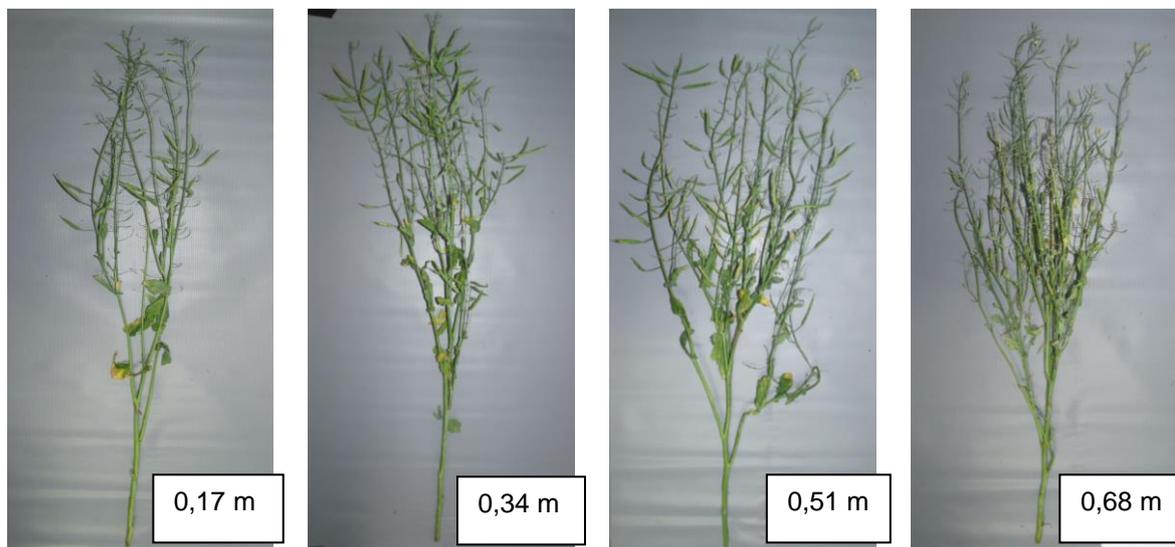
Abscisão foliar no final do subperíodo de roseta (a), abscisão de flores (b), abscisão de síliquas (c), perda da dominância apical (d), gemas axilares em crescimento (e) e deficiência nutricional de fósforo (f) em resposta as alterações fisiológicas condicionadas pelo excesso hídrico em terras baixas no cultivo de *Brassica napus* L. Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

APÊNDICE G – RAMIFICAÇÃO DE CANOLA SUBMETIDA AO EXCESSO HÍDRICO EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS

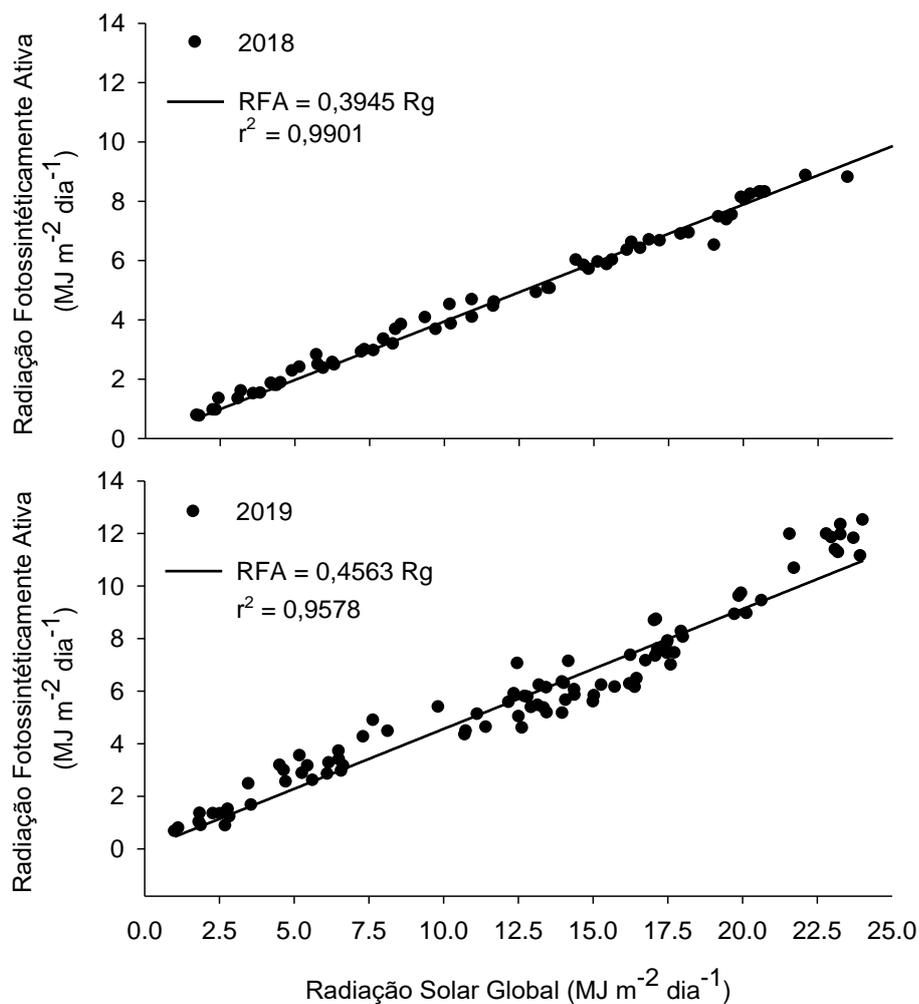
Disposição dos ramos laterais em canola submetida a variação do espaçamento entre linhas de semeadura em ambiente com excesso hídrico na safra de 2018. Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

APÊNDICE H – RELAÇÃO RFA/R_g EM DOSEL DE CANOLA EM TERRAS BAIXAS

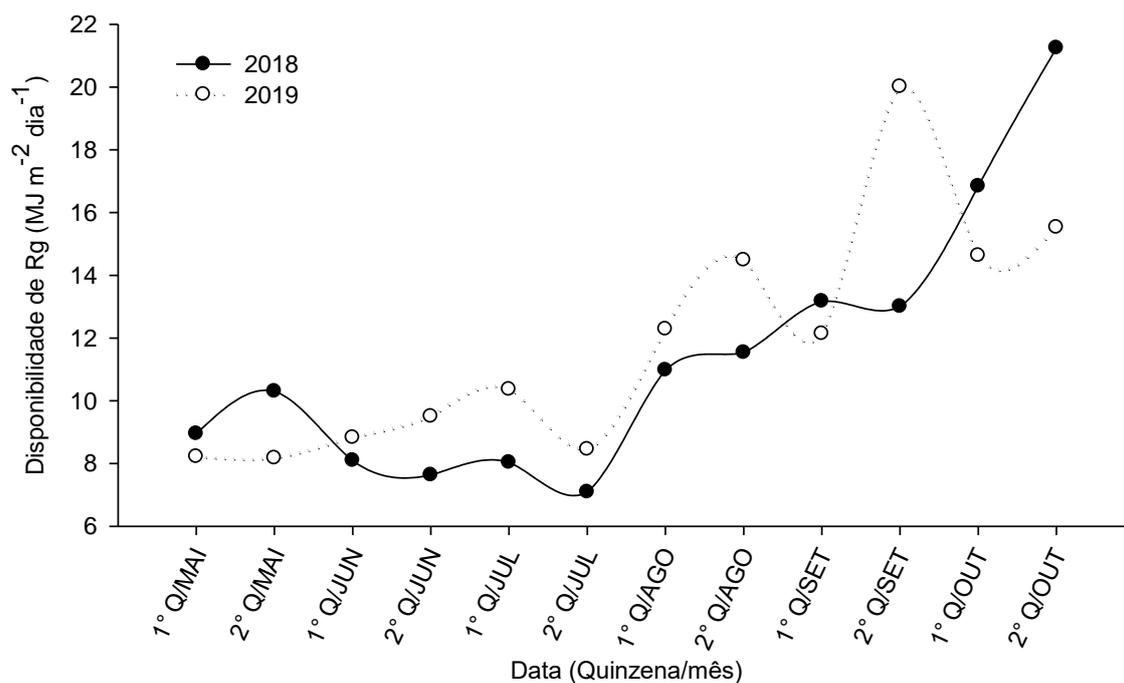
Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA_{inc}) e radiação solar global (R_g) utilizado para a estimativa dos valores não mensurados em campo de RFA interceptada durante o desenvolvimento da canola em 2018 (a) e 2019 (b). Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

APÊNDICE I – DISPONIBILIDADE MÉDIA DE RADIAÇÃO SOLAR DURANTE OS MESES DE MAIO A OUTUBRO

Média diária de disponibilidade de radiação solar global incidente (R_g , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para cada quinzena, durante os meses de maio a outubro de 2018 e 2019, compreendendo ao período em que as plantas de canola foram submetidas ao cultivo no município de Santa Maria, Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Autor.

ANEXO A – ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DA CANOLA

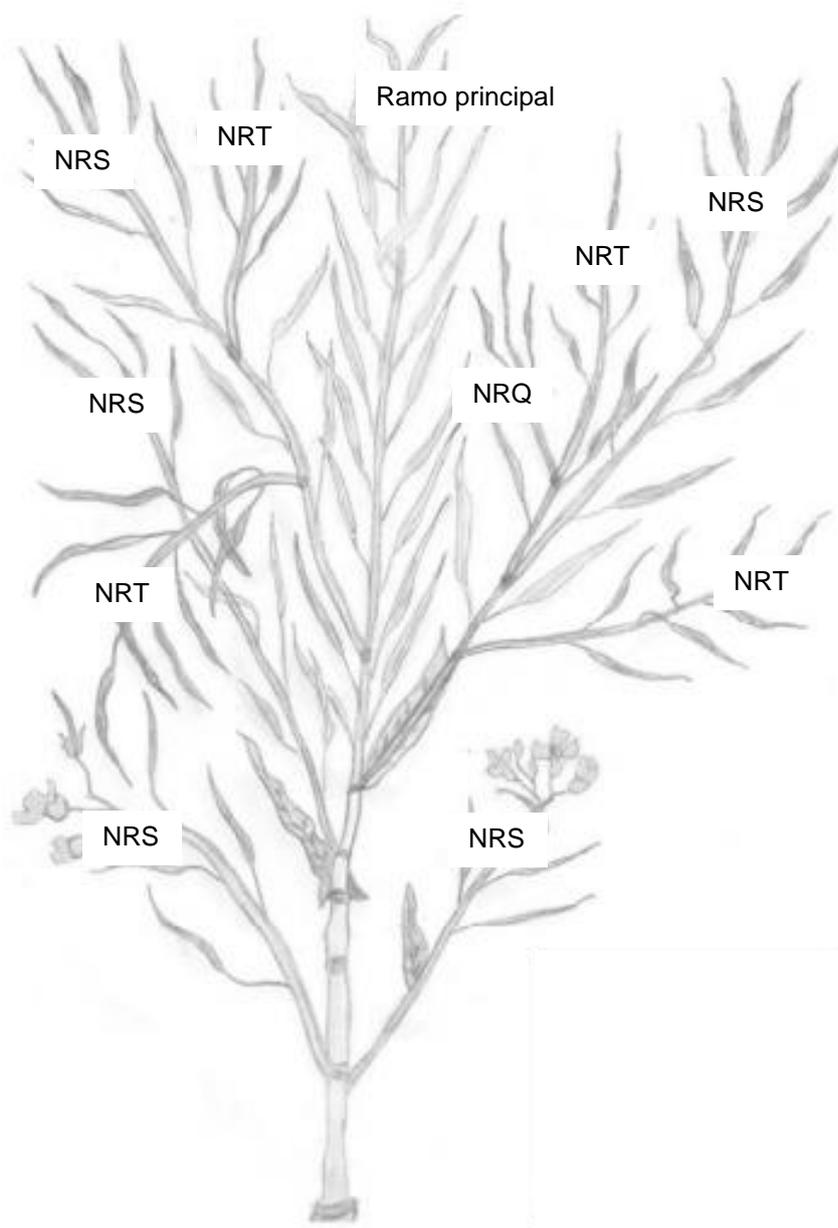
Escala fenológica da cultura da canola adaptado de CETIOM com os principais subperíodos (Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux et du Chhanvre). Santa Maria, RS, 2021

Estádio	Caracterização	Subperíodo
S	Semeadura	Germinação
A	Cotilédones visíveis	Emergência
B1	Uma folha verde desenvolvida	Plântula
B2	Duas folhas verdes desenvolvidas	
B3 a B6	Três a seis folhas verdes desenvolvidas	Roseta
C1	Aparecimento de novas folhas	
C2	Entrenós visíveis e vestígios de ramificação principal	
D1	Inflorescência visível	Alongamento
D2	Botão coberto com inflorescências secundárias visíveis	
E	Botão separado	
F1	Primeiras flores abertas	Florescimento
	Alongamento do ramo floral com numerosas flores	
F2	abertas	
G1	Queda de pétala com 10 primeiras síliquas com 2 cm	Maturação
G3	Síliquas com mais de 4 cm	
FF	Final do florescimento	
G4	10% das síliquas com grãos de coloração escura	Maturação
G5	90% das síliquas com grãos de coloração escura	

Fonte: Iriarte e Valetti (2008).

ANEXO B – DISPOSIÇÃO DOS RAMOS LATERAIS EM CANOLA

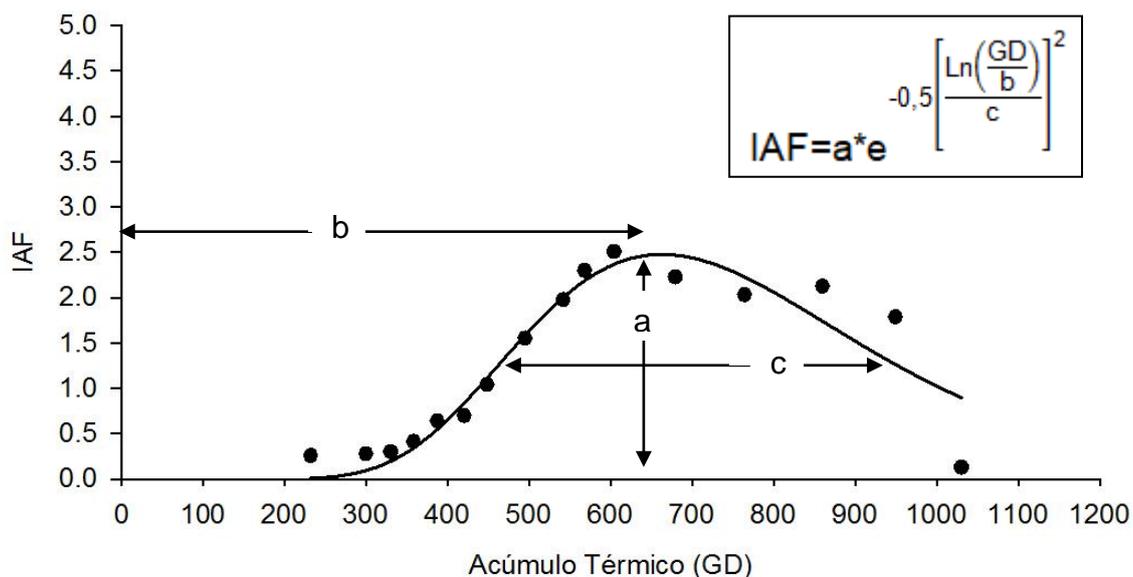
Configuração da distribuição de ramos secundários (NRS), ramos terciários (NRT) e ramos quaternários (NRQ) em planta de canola no momento da maturação fisiológica da planta. Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Adaptado de CANOLA COUNCIL (2021).

ANEXO C – MODELO NÃO LINEAR UTILIZADO NA DETERMINAÇÃO DO IAF

Representação dos coeficientes que expressam o IAF máximo (a), a necessidade térmica para o IAF máximo (b) e a longevidade do IAF (c) do modelo não linear para a estimativa do índice de área foliar em função do acúmulo térmico (GD) na canola em 2018/19 em ambientes com elevação do lençol freático. Santa Maria, RS, 2021



Fonte: Adaptado de Nied (2013).