

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

Jocélia Rosa da Silva

**PRODUTIVIDADE DA CANOLA EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES
AGROMETEOROLÓGICAS NO RIO GRANDE DO SUL**

Santa Maria, RS
2022

Jocélia Rosa da Silva

**PRODUTIVIDADE DA CANOLA EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES
AGROMETEOROLÓGICAS NO RIO GRANDE DO SUL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau em **Doutora em Agronomia**.

Orientador: Prof. Dr. Arno Bernardo Heldwein

Santa Maria, RS
2022

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

Silva, Jocélia Rosa da
Produtividade da canola em função das condições
agrometeorológicas no Rio Grande do Sul / Jocélia Rosa da
Silva.- 2022.
87 p.; 30 cm

Orientador: Arno Bernardo Heldwein
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Agronomia, RS, 2022

1. Brassica napus L. var. oleifera 2. quociente
fotothermal 3. radiação solar 4. temperatura do ar 5.
déficit hídrico I. Heldwein, Arno Bernardo II. 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.

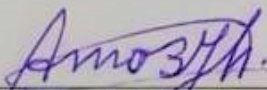
Declaro, JOCÉLIA ROSA DA SILVA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Jocélia Rosa da Silva

**PRODUTIVIDADE DA CANOLA EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES
AGROMETEOROLÓGICAS NO RIO GRANDE DO SUL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau em **Doutora em Agronomia**.

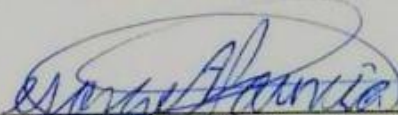
Aprovada em 29 de julho de 2022.



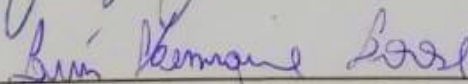
Arno Bernardo Heldwein, Dr. (UFSM)
(Presidente Orientador)



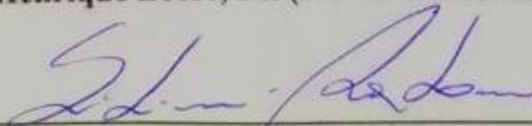
Ivan Carlos Maldaner, Dr. (Colégio Politécnico -UFSM)



Jorge Alberto de Gouvêa, Dr. (EMBRAPA Trigo)



Luis Henrique Loose, Dr. (IFFAR-Santo Ângelo)



Sidinei Zwick Radons, Dr. (UFFS-Cerro Largo)

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me conceder a vida e proporcionar a mim grandes oportunidades.

À minha mãe Mara Silvana R. da Silva e ao meu padrasto Floriavante Rodrigues, por serem meus exemplos de coragem e determinação, que me incentivaram e batalharam para que pudesse me oferecer um futuro melhor, apoiando minhas decisões. Aos meus avós Selma e José pelo amor incondicional e meus irmãos Gêssica, Giovana, Gabriel e Pietra pelo amor, confiança, incentivo e apoio em todos os momentos.

Ao meu colega, amigo e namorado, Eduardo, com quem divido todos os momentos, sejam eles de alegria ou tristeza, de dificuldade ou tranquilidade. Pelo apoio, carinho e amor.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, por proporcionar-me a oportunidade de crescimento intelectual e pessoal.

Ao CNPq pela concessão de bolsa de estudos, possibilitando dedicação integral a realização desse trabalho.

Ao professor Dr. Arno Bernardo Heldwein, pela orientação, disposição, confiança, paciência, profissionalismo exemplar e contribuição para o meu crescimento pessoal e intelectual durante minha trajetória acadêmica, especialmente durante a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Astor Henrique Nied pela amizade e pelos ensinamentos transmitidos durante a realização desse trabalho.

Aos professores Ivan Carlos Maldaner e Luis Henrique Loose e ao pesquisador Genei Antônio Dalmago pela disponibilização dos dados que compõe essa tese.

Aos colegas e amigos do Setor de Agrometeorologia do Departamento de Fitotecnia da UFSM, pelos ensinamentos, amizade, auxílio na condução dos experimentos e pelos momentos de descontração.

Aos meus amigos Bruna, Luthiana, Vítor e Fagner pela amizade e companheirismo.

Aos familiares, amigos e demais pessoas não mencionadas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

Meu muito obrigada!

RESUMO

PRODUTIVIDADE DA CANOLA EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS NO RIO GRANDE DO SUL

AUTORA: Jocélia Rosa da Silva
ORIENTADOR: Arno Bernardo Heldwein

O conhecimento da interação entre as variáveis meteorológicas e/ou ambientais, suas variabilidades e a produtividade da cultura da canola são essenciais para a análise da variabilidade do desempenho de genótipos para o planejamento espacial e temporal dessa cultura. Deste modo, os objetivos deste estudo foram: determinar o subperíodo com maior correlação entre a produtividade de grãos de canola com o quociente fototermal e o modelo de determinação do quociente fototermal com maior correlação; avaliar a produtividade de grãos de canola semeada em amplo período de semeadura em diferentes locais do Rio Grande do Sul, caracterizando as relações entre a produtividade máxima de grãos e os elementos meteorológicos. Os dados de produtividade e fenologia de diferentes genótipos de canola foram coletados em quatro municípios do Rio Grande do Sul, em semeaduras de março a agosto (2010-2019). A relação entre a produtividade de grãos de canola e o quociente fototermal foi avaliada para diferentes subperíodos de desenvolvimento pelo método original e as suas modificações. O subperíodo do início ao final do florescimento foi o que demonstrou maior correlação entre o quociente fototermal e a produtividade. A deficiência e o excesso hídrico são fatores estressantes às plantas de canola, demonstrando diminuição linear da produtividade máxima com o aumento desses estresses. A resposta da produtividade máxima de grãos de canola é linear positiva à medida que o índice de satisfação das necessidades de água aumenta. A produtividade máxima da canola é influenciada pela radiação solar, condições térmicas e hídricas. Máximas produtividades de grãos de canola foram obtidas em semeaduras realizadas de maio a junho.

Palavras-chave: *Brassica napus* L. var. *oleífera*. Quociente fototermal. Radiação solar. Temperatura do ar. Déficit hídrico.

ABSTRACT

CANOLA YIELD AS A FUNCTION OF AGROMETEOROLOGICAL CONDITIONS IN RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: Jocélia Rosa da Silva
ADVISER: Arno Bernardo Heldwein

Knowledge of the interaction between meteorological and/or environmental variables, their variability and canola crop productivity are essential for analyzing the variability of genotype performance for the spatial and temporal planning of this crop. Thus, the objectives of this study were: to determine the sub-period with the highest correlation between canola grain yield and the photothermal quotient and the photothermal quotient determination model with the highest correlation; to evaluate the yield of canola grains sown in a wide sowing period in different locations in Rio Grande do Sul, characterizing the relationship between maximum grain yield and meteorological elements. Yield and phenology data of different canola genotypes were collected in four municipalities in Rio Grande do Sul, in sowings from March to August (2010-2019). The relationship between canola grain yield and photothermal quotient was evaluated for different developmental sub-periods by the original method and its modifications. The sub-period from the beginning of flowering to the end of flowering was the one that showed the highest correlation between the photothermal quotient and productivity. Water deficiency and excess are stressful factors for canola plants, showing a linear decrease in maximum productivity with the increase of these stresses. The response of maximum canola grain yield is linear positive as the rate of satisfaction of water requirements increases. The maximum yield of canola is influenced by solar radiation, thermal and water conditions. Maximum yields of canola grains were obtained in sowings carried out from May to June.

Keywords: *Brassica napus* L. var. *oleifera*. Photothermal coefficient. Solar radiation. Air temperature. Water deficit.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

Figura 1- Mapa de altitude do Rio Grande do Sul com indicação dos municípios de Passo Fundo, Santa Maria, São Vicente do Sul e Santo Ângelo, onde foram obtidos os dados experimentais de fenologia e produtividade de genótipos de canola em diferentes datas de semeadura. 27

Figura 2 - Regressões lineares entre o quociente fototermal proposto por Fischer, modificado pela soma térmica (QF Fischer ST) no subperíodo de início ao final do florescimento e a produtividade de grãos da canola para genótipos Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61..... 35

Figura 3 - Variabilidade, mediana e média (valores) da duração do subperíodo de início ao final do florescimento, em dias, para os genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019..... 36

Figura 4 - Relação entre o quociente fototermal proposto por Fischer, modificado pela soma térmica (QF Fischer ST) para o subperíodo compreendido entre o início e o final do florescimento e respectivas datas de semeadura, expressas em dia do ano, para quatro locais e 7 anos de experimentos, totalizando 96 interações entre genótipo de canola e ambiente. 37

ARTIGO 2

Figura 1 – Variabilidade, média (valores) e mediana da produtividade de grãos (kg ha^{-1}) para os genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019. 51

Figura 2 - Relação entre a temperatura máxima média do ar (A), temperatura máxima absoluta do ar (B), temperatura mínima média do ar (C) e temperatura mínima absoluta do ar (D) durante o subperíodo compreendido desde o início da floração até o final da floração (IF-FF) e a produtividade máxima de grãos de genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019..... 53

Figura 3 - Relação entre a temperatura média diurna do ar (A), temperatura média noturna do ar (B), temperatura média do ar (C) durante o subperíodo compreendido desde o início da floração até o final da floração (IF-FF) e a a produtividade máxima de grãos de genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019. 57

Figura 4 - Relação entre a radiação solar acumulada (A), radiação solar média (B), soma térmica acumulada (C), soma térmica média diária (D) e duração em dia (E) do subperíodo compreendido entre o início do florescimento até o final do florescimento (IF-FF) e a produtividade máxima de grãos de genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht

B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019..... 59

Figura 5 – Relação entre a precipitação pluviométrica acumulada (A), precipitação pluviométrica média (B), dias com excesso hídrico (C), percentual de dias com excesso hídrico (D), déficit hídrico acumulado (E) e déficit hídrico médio (F) no subperíodo compreendido entre o início do florescimento até o final do florescimento (IF-FF) e a produtividade máxima de grãos de genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019..... 62

Figura 6 – Relação entre a evapotranspiração máxima da cultura (ETm) (A), índice de satisfação por necessidade de água (B), velocidade média do vento (C) e fotoperíodo (D) no subperíodo compreendido entre o início do florescimento até o final do florescimento (IF-FF) e a produtividade máxima de grãos de genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019..... 66

Figura 7 - Relação entre data de semeadura e a produtividade máxima de grãos de genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019 69

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

Tabela 1 - Ano de cultivo, local, datas de semeadura e genótipos de canola semeados em Passo Fundo (PF), Santa Maria (SM), São Vicente do Sul (SVS) e Santo Ângelo (SA).	28
Tabela 2 - Valores do coeficiente de correlação de Pearson	31
Tabela 3 - Coeficiente de correlação simples de Pearson entre o quociente fototermal(QF) proposto por Fischer (1985), QF proposto por Fischer (1985) com modificação pelo uso da soma térmica (Fischer ST), QF proposto Dhillon e Ortiz-Monasterio (1993) (DOM) e o QF proposto por Dhillon e Ortiz-Monasterio (1993), modificado pelo uso da ST (DOM ST) com a produtividade de grãos de canola, nos diferentes períodos compreendidos entre a pré-antese até o final do florescimento.	32

ARTIGO 2

Tabela 1 - Ano de cultivo, local, data de semeadura e genótipos de canola semeados em Passo Fundo (PF), Santa Maria (SM), São Vicente do Sul e Santo Ângelo (SA).	46
--	----

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 A CULTURA DA CANOLA	14
2.2 FATORES EDAFOCLIMÁTICOS QUE AFETAM A PRODUTIVIDADE DA CANOLA	16
2. ARTIGO 1 - QUOCIENTE FOTOTERMAL E PRODUTIVIDADE DA CANOLA 23	
INTRODUÇÃO.....	25
MATERIAL E MÉTODOS	26
RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
CONCLUSÕES.....	38
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
3. ARTIGO 2 – CONDIÇÕES AMBIENTAIS NO FLORESCIMENTO E A PRODUTIVIDADE MÁXIMA DA CANOLA EM CLIMA SUBTROPICAL.....	42
INTRODUÇÃO.....	44
MATERIAL E MÉTODOS	45
RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
CONCLUSÃO.....	70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
5. DISCUSSÃO GERAL	76
6. CONCLUSÕES.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
APÊNDICE	87

INTRODUÇÃO

A canola é uma cultura agrícola que vem ganhando destaque no Brasil, principalmente na região Sul. É alternativa para áreas que geralmente ficam em pousio durante o período de inverno e/ou diversificação de cultivo em rotação aos cereais de inverno, gerando renda pela produção de grãos em uma estação que muitas lavouras se encontram sob pousio. Em 2021, uma área de 39,1 mil hectares foi semeada com a cultura de canola no Brasil, com maior destaque para o Rio Grande de Sul, com 38,3 mil hectares. A produtividade média brasileira, de 1399 kg ha⁻¹ na safra de 2021 (CONAB, 2022), é considerada baixa, tendo em vista que o potencial produtivo de grãos de alguns genótipos cultivados no Brasil alcança 3.500 kg ha⁻¹ (SANCHES et al., 2014).

Durante seu ciclo, a canola é suscetível a estresses meteorológicos/ambientais, como altas temperaturas do ar e ocorrência de geada nos períodos de folhas cotiledonares e de florescimento e formação de siliquis, que podem resultar em mortes de plantas e redução na produtividade. Também existe o risco de perdas na colheita, devido à heterogeneidade de maturação, vendavais associados à forte deiscência natural das siliquis e a ocorrência de períodos chuvosos que dificultam a colheita no melhor momento (DRECCER et al., 2018; PIZOLOTTO et al, 2018). Quebras de safra na cultura da canola, que ocorrem em razão de adversidades meteorológicas, em que um ou mais elementos meteorológicos ocorrem fora da faixa considerada ótima para a cultura, podem causar prejuízos à agricultura (GOUVÊA et al., 2017). Portanto, é de extrema necessidade a quantificação dos efeitos das condições meteorológicas/ambientais na produtividade da canola, visando obter informações mais seguras que possam ser utilizadas em estratégias de manejo da cultura para mitigar perdas na produtividade de grãos.

A semeadura de culturas em ampla faixa de datas, em diferentes locais de cultivo, é importante para determinar o impacto dos elementos meteorológicos na produtividade máxima e os seus efeitos negativos. Os fatores meteorológicos limitantes associados e sua variabilidade podem ser gerenciados pelos produtores rurais por meio da escolha do local e data de semeadura. A identificação dos fatores que estão contribuindo para a redução de produtividade da canola é importante para o direcionamento de estratégias de manejo que promovam o aumento do rendimento de grãos e, em consequência, contribuir para a segurança alimentar e/ou maior produção de óleo vegetal para a produção de biodiesel.

A cultura da canola apresenta grande potencial de cultivo na região Sul do Brasil, devido ao clima e solos adequados. Entretanto, apresenta alta variabilidade da produtividade anual devido a resposta a variáveis meteorológicas/ambientais, que devem ser estudadas com maior detalhamento nos diferentes ambientes de cultivo. Para tanto, é necessária a obtenção de dados e a geração de informações e de conhecimento, com vistas à compreensão dos processos envolvidos na expressão do rendimento de grãos de canola em um panorama mais amplo.

Deste modo, a produtividade de grãos de canola foi avaliada em amplas faixas de datas de semeadura, em quatro diferentes locais do Rio Grande do Sul, e os objetivos deste trabalho foram de caracterizar as relações entre a produtividade máxima de grãos e as variáveis meteorológicas que ocorreram ao longo do subperíodo de florescimento da canola; determinar o subperíodo com maior correlação entre o rendimento de grãos com o quociente fototermal, e estabelecer o modelo de determinação do quociente fototermal com maior correlação com a produtividade.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A CULTURA DA CANOLA

A canola é uma das quatro oleaginosas mais cultivadas em nível mundial, juntamente com a soja, o girassol e a palma, (FAOSTAT, 2022), porém ainda tem pouca expressão no Brasil (CONAB, 2022). Dentre os principais usos da canola estão a produção de óleo para consumo humano, farelo para a alimentação animal, além de ser uma importante fonte de óleo para a geração de biodiesel. Atualmente, a produção mundial de canola está concentrada, predominantemente, nas regiões geográficas próximas aos trópicos, com predomínio de clima seco, e nas regiões de clima temperado, com destaque para China, Canadá, Índia, Alemanha e França, que foram os maiores produtores mundiais de canola em 2020 (FAOSTAT, 2022). Na maioria desses países, observa-se cultivo de genótipos de inverno, cujo período de semeadura é realizado entre os meses de setembro a novembro, com ciclo mais longo e alto potencial produtivo.

Devido as condições de inverno, com baixa disponibilidade de frio, a canola semeada no Brasil é de genótipos de primavera, pois, mesmo nos locais mais frios, a vernalização requerida pelas cultivares invernais não é atendida (TOMM et al., 2009). É característica dos genótipos de primavera apresentarem ciclo mais curto, serem pouco exigentes em vernalização, mas apresentam menor potencial de produção, quando comparados a genótipos de inverno em outros países, principalmente nos países do hemisfério norte, em que o subperíodo reprodutivo ocorre sob disponibilidade de radiação solar significativamente maior do que no sul do Brasil.

Atualmente, os híbridos de canola de primavera disponíveis para lavouras comerciais no Brasil foram, na sua maioria, desenvolvidos na Austrália e Argentina, regiões com características térmicas climáticas semelhantes às do Rio Grande do Sul, porém com menor precipitação pluvial e umidade no ar. Cada ambiente possui suas limitações e potencialidades, que podem afetar negativamente e/ou positivamente a produtividade da canola. Atualmente o principal objetivo do melhoramento genético para a cultura da canola é o aumento de produtividade de grãos e óleo e a resistência poligênica ao fungo causador da canela-preta (EMBRAPA, 2014). A busca do melhoramento genético pelo aumento de produtividade é uma demanda do produtor rural, que deseja maior lucratividade sem o aumento de área de cultivo. No entanto, o melhoramento da maior parte dos híbridos disponíveis para compra no Brasil, foi realizado em condições

climáticas diferentes das aqui encontradas, o que pode gerar implicações negativas no desempenho produtivo desses materiais.

Os genótipos de canola atualmente disponíveis no mercado brasileiro podem chegar até 1,66 m de altura, porém a característica de plantas de menor altura, aliada a arquitetura compacta, confere grande resistência ao acamamento, o que permite colheita rápida e proporciona a passagem de menor quantidade de palha através da colhedora (TOMM et al., 2009). Rathke et al. (2005) afirmam que a canola apresenta elevada plasticidade fenotípica, compensando falhas populacionais com emissão de folhas, ramificações secundárias e terciárias. Apesar da plasticidade ser uma grande vantagem em situações de estresses, resulta em uma indesejável heterogeneidade temporal na emissão das siliquis, impactando negativamente a uniformidade da maturação da cultura. A maturação das siliquis da canola se dá de forma acrópeta, de baixo para cima na haste principal e dos ramos primários para os secundários (MARCHIORI JR, 2002). Com a maturação as siliquis abrem-se, devido deiscência natural, e pela heterogeneidade de maturação das siliquis ao longo da planta, no momento da colheita ocorrem perdas, tanto pela queda das sementes maduras no solo e pela colheita de grãos ainda com alto teor de umidade, o que pode gerar por amassamento dos grãos, custos extras durante o processo de secagem dos grãos e a presença de grãos verdes, fenômeno indesejável para a indústria de óleos vegetais.

Plantas com menor estatura e menor número de ramificações, apresentam melhor homogeneidade na maturação das siliquis, principalmente em situações com alto nível tecnológico, com bom manejo de pragas, doenças e plantas daninhas. Porém, pela menor emissão de ramificações, a densidade de plantas deve ser reconsiderada e provavelmente ser aumentada. À medida que a colheita é retardada aumenta-se o problema de deiscência das siliquis e, conseqüentemente, as perdas anteriores e durante a colheita (MARCHIORI JR, 2002). A busca de genótipos com baixa deiscência natural das siliquis é fundamental para evitar perdas de produtividade e gastos extras com produtos como dessecantes químicos que visam promover a maturação mais uniforme das siliquis e/ou emprego de adjuvantes adesivos (FREITAS; GARCIA, 2017).

Em território brasileiro o cultivo da canola atualmente ainda é restrito, sendo os estados do Rio Grande do Sul e do Paraná responsáveis por quase 100% da produção nacional (CONAB, 2022). No entanto, há potencial de cultivo da canola em outras regiões do Brasil, possibilitando futura expansão das áreas (ARAÚJO et al., 2021). Com produção de 54,7 mil toneladas e produtividade média em torno de 1399 kg ha⁻¹ na safra

de 2021, a canola está sendo cultivada em aproximadamente 39,1 mil hectares (CONAB, 2022). Com relação aos estados produtores, o maior é o Rio Grande do Sul, produzindo 98% da canola brasileira (CONAB, 2022). Esta produtividade é relativamente baixa, tendo em vista o alto potencial produtivo de alguns genótipos de canola, ultrapassando 3145 kg ha^{-1} , quando se tem um correto manejo de irrigação e de adubação nitrogenada, como verificado em Dourados – MS (SANCHES et al., 2014).

A canola começou a ser cultivada em escala comercial no Brasil, mais precisamente no estado do Rio Grande do Sul, em 1974 (ESTEVEZ et al., 2014). A semeadura no Sul do Brasil é realizada no outono e início do inverno (KAEFER et al., 2014). Vem ganhando destaque principalmente por ser uma das melhores alternativas à diversificação de culturas no período de inverno em rotação com o trigo, por ser uma cultura produtora de grãos e garantir renda ao produtor. A canola também mostra potencial comercial por ser uma das poucas oleaginosas cultivada no inverno, visto que para a maioria das outras culturas oleaginosas essa época do ano é desfavorável ao seu cultivo.

Por ser uma cultura de grande potencial para o Sul do Brasil, a resposta da cultura em diferentes ambientes e a sua produtividade de grãos devem ser mais estudadas e detalhadas, para tornar mais eficiente a cadeia produtiva agrícola no período de inverno, possibilitando proporcionar geração de renda ao produtor rural, uso das áreas ociosas no período de inverno, além de maior diversificação da matriz energética de biodiesel.

2.2 FATORES EDAFOCLIMÁTICOS QUE AFETAM A PRODUTIVIDADE DA CANOLA

A baixa produtividade média da canola no sul do Brasil está relacionada principalmente às condições meteorológicas que ocorrem ao longo do ciclo da cultura. Dentre os elementos meteorológicos que afetam diretamente o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da canola destacam-se a temperatura do ar, a radiação solar incidente e a precipitação pluvial (ROBERTSON et al., 2002; SANCHES et al., 2014).

O fotoperíodo possui influência no desenvolvimento das plantas, pois algumas espécies só iniciam a fase reprodutiva quando há ocorrência de um valor crítico de fotoperíodo (BERGAMASCHI; BERGONCI, 2017), como é o caso da canola. Segundo Robertson et al. (2002), a canola é responsiva ao fotoperíodo, sendo uma planta de dia longo, com indução à antese para uma ampla faixa de fotoperíodo, entre 10,8 e 16,3 horas. Porém os genótipos de canola cultivados atualmente no Brasil, em grande maioria

híbridos, apresentam menor sensibilidade ao fotoperíodo e maior resposta à temperatura do ar, que os genótipos de polinização aberta (DALMAGO et al., 2009).

A temperatura do ar desempenha função essencial no ciclo de uma planta, afeta todas as reações bioquímicas da fotossíntese e síntese de compostos secundários, bem como a integridade de membranas de células e organelas. A ocorrência de temperaturas do ar favoráveis é crucial para o crescimento vegetal, porque a fotossíntese líquida máxima ocorre dentro de uma faixa de temperatura relativamente estreita. O pico da taxa fotossintética líquida em uma faixa de temperaturas é descrito como ideal térmico fotossintético. Quando a temperatura ótima para determinada planta é ultrapassada, abaixo ou acima dela, as taxas fotossintéticas líquidas decrescem novamente. A temperatura do ar considerada ótima para a canola durante o ciclo de desenvolvimento está em torno de 21°C (MORRISON, 1993). O ideal térmico fotossintético reflete componentes bioquímicos, genéticos (adaptação) e ambientais (aclimação) (TAIZ et al., 2017). A temperatura do ar é o fator que mais influencia o desenvolvimento fenológico da canola (FARAJI et al., 2009; LUZ et al., 2012; BATTISTI, et al. 2013). Segundo Luz et al. (2012), existe uma relação linear negativa entre temperatura do ar e a duração do ciclo, indicando que o aumento da temperatura do ar determina diminuição da duração do ciclo e dos subperíodos, sendo o subperíodo mais sensível à temperatura do ar, o de emergência até o final do florescimento.

Para se obter o potencial produtivo da canola o ambiente ideal, em relação à temperatura do ar, deveria estar sempre perto da considerada como ótima em torno de 21 °C (ROBERTSON et al., 2002), porém, sem ser em condições controladas essa situação contínua é impossível. Mas, as escolhas de datas de semeadura permitem posicionar temporalmente a cultura para que temperaturas do ar mais favoráveis coincidam com os subperíodos críticos da cultura.

Temperaturas do ar entre 25 e 30 °C limitam a taxa de assimilação fotossintética de CO₂ em plantas C₃, como a canola, pela redução da solubilidade do CO₂, aumento da solubilidade do O₂ e incremento na função oxigenase da RUBISCO. Temperaturas maiores que 30 °C afetam os processos de transporte de elétrons ligados às membranas dos cloroplastos (e mitocôndrias), reduzindo a geração de poder redutor necessário, para o ciclo de redução das pentoses fosfato (Ciclo de Calvin e Benson), provocando um decréscimo acentuado na fotossíntese (TAIZ et al., 2017). No estágio reprodutivo da canola, temperaturas acima de 27°C, podem causar danos irreversíveis como o abortamento de flores e siliquas, o que reduz drasticamente o potencial produtivo da

canola (BATTISTI et al., 2013). Faraji et al. (2009) encontraram uma relação linear negativa entre o aumento na temperatura do ar e a produtividade da canola, na fase de enchimento de grãos, com redução de até 337 kg ha⁻¹ de produtividade de grãos com o acréscimo de 1°C na temperatura média diária nessa fase, na faixa de temperatura de 16 °C a 26 °C. Evitar que temperaturas do ar elevadas ou baixas, em nível que possam causar danos às plantas coincidam com o ciclo da cultura, especialmente com subperíodos críticos, por meio da escolha de datas de semeadura as mais favoráveis, pode ser uma alternativa decisiva para obter sucesso na produtividade da cultura.

Baixas temperaturas do ar diminuem a fluidez das membranas, provocando o desacoplamento de diferentes complexos multiproteicos, a perturbação do fluxo de elétrons e das reações energéticas, além de reduzir a absorção de água quando as raízes são submetidas a baixas temperaturas (TAIZ et al., 2017). A temperatura basal inferior da canola, ou seja, abaixo da qual o desenvolvimento da planta é nulo ou desprezível, pode variar de -0,8 à 10°C dependendo da cultivar e do estágio de desenvolvimento (ROBERTSON et al., 2002; LUZ et al., 2012). Para Thomas (2014) temperaturas do ar menores ou iguais a 3 °C já se mostram prejudiciais.

Estresses por geada/congelamento ocorrem com temperaturas do ar abaixo de 0 °C e normalmente são irreversíveis. Plantas submetidas a temperaturas de congelamento enfrentam a formação de cristais de gelo, intra e extracelular, e quando ocorre intracelular quase sempre se mostra letal à célula. A formação de cristais de gelo diminui o potencial hídrico do apoplasto, que se torna mais negativo que o do simplasto e, deste modo, a água não congelada dentro da célula pois tende a fluir em direção aos cristais de gelo nos espaços intercelulares (MELO-ABREU et al., 2010). À medida que a água deixa a célula, a membrana plasmática contrai-se ficando enrijecida pela temperatura baixa e afasta-se da parede celular, podendo ficar danificada, quanto mais baixa a temperatura, mais água se desloca para o baixo potencial hidráulico nesse gradiente em direção à água congelada (TAIZ et al., 2017). O desequilíbrio no potencial hídrico ocasionado pelo congelamento resulta na desidratação das células, situação parecida com o estresse por déficit hídrico (XIN; BROWSE, 2000).

Os danos causados pela ocorrência de geada dependem, dentre outros fatores, do estágio fenológico. Para a canola os 30 primeiros dias após a emergência (DALMAGO et al., 2008) e a fase de floração e enchimento de grãos (DALMAGO, et al., 2010; KOVALESKI, 2019; KOVALESKI et al., 2019; THOMAS, 2003) são os mais críticos à ocorrência de geada, porém os danos podem ser minimizados se anterior a geada houver

aclimação das plantas (DALMAGO, et al., 2010; KOVALESKI et al., 2019). O processo de aclimação das plantas baseia-se na exposição gradual a temperaturas do ar entre 2 e 7 °C, no período que antecede a ocorrência de geadas. A aclimação promove um conjunto de mudanças fisiológicas e bioquímicas capaz de reduzir os danos causados por geada (BOROVSKII et al., 2002). Resultados obtidos por Dalmago et al. (2010), demonstraram que no início do desenvolvimento do ciclo a ocorrência de dois ou três dias com geadas consecutivas, de intensidade leve, moderada e moderadamente forte, não causam danos significativos às plantas de canola, desde que ocorra um período de aclimação.

As plantas respondem diretamente a mudanças no ambiente, alterando sua fisiologia e/ou morfologia para melhorar a sobrevivência e a reprodução, e tais respostas não requerem novas modificações genéticas. Quando a resposta da planta melhora com a exposição repetida ao estresse ambiental, ela é chamada de aclimação. A aclimação representa uma mudança não permanente na fisiologia ou morfologia do indivíduo, podendo ser revertida se as condições ambientais prevalentes se alterarem (TAIZ et al., 2017). Portanto, ambos os fenômenos, a aclimação de plantas ao frio, e as probabilidades de ocorrência de geadas, devem ser considerados para a alocação espacial e temporal da cultura da canola, com vistas para a redução de perdas de produtividade. Essa atenção deve ser especial para período de estabelecimento da cultura (primeiros 30 dias) e para o florescimento e o enchimento de grãos, subperíodos críticos para a canola (DALMAGO, et al., 2010; THOMAS, 2003).

Outra variável meteorológica que afeta a produtividade de culturas agrícolas é a precipitação pluvial. Na canola, a deficiência de água afeta diretamente a fenologia, o crescimento e a produtividade de grãos (HERGERT et al. 2016; NOROUZI et al. 2008; AHMADI; BAHRANI; 2009). Os efeitos mais pronunciados do déficit hídrico na canola são observados durante o florescimento ou o enchimento das síliquas (RICHARDS; THURLING, 1978), porém efeitos negativos, apesar de serem potencialmente reversíveis, também são observados no estágio vegetativo. Sob estresses hídricos, acelera-se o ciclo da cultura, com aumento nos teores de ácidos graxos insaturados e redução dos saturados, diminuindo assim qualidade do óleo (DOGAN et al., 2011).

Bilibio et al. (2011) obtiveram redução drástica do crescimento de plantas de colza sob condição de déficit hídrico de 60%, com redução de 39% de matéria seca total, redução de 43% do número de ramos e 27% de redução do número de folhas quando comparado ao tratamento sem déficit hídrico. Norouzi et al. (2008) também creditam ao

efeito do déficit hídrico a redução na taxa de crescimento da parte aérea e altura de canola, porém o crescimento radicular foi menos sensível à seca. O aprofundamento das raízes é uma resposta ao déficit hídrico do solo desde que a raiz não encontre nenhum impedimento físico, como a compactação de camadas subsuperficiais, ou impedimentos químicos, como a presença de elementos tóxicos, a exemplo do alumínio oxireduzido.

O déficit hídrico também tem efeito na fenologia da canola. Hergert et al. (2016) observaram aceleração do ciclo da canola sem irrigação comparado com o uso de irrigação. Este comportamento pode ser visto como uma estratégia de sobrevivência das plantas aos estresses hídricos, porém com ciclo mais curto, a planta terá menos tempo para sintetizar e transportar fotoassimilados aos grãos, o que pode resultar em diminuição do potencial produtivo. Geralmente um único evento de déficit hídrico de curta duração, no estágio vegetativo ou no alongamento tem pouco efeito no crescimento e na produtividade de grãos, enquanto o déficit hídrico no estágio de antese ou na fase de enchimento de grãos reduz significativamente a produtividade, diminuindo o número de siliquas, sementes por siliquas e o índice de colheita (MA et al., 2006). No Irã a canola é cultivada após rotação com os cereais de inverno, onde seu estágio reprodutivo é frequentemente exposto ao déficit hídrico. Ahmadi e Bahrani (2009) obtiveram redução de 29,5% e 31% na produtividade de grãos e óleo, respectivamente, causado pelo déficit hídrico no início da floração. Quando a exposição ao déficit hídrico é frequente e inevitável a escolha de genótipos mais tolerantes é uma alternativa a ser considerada (NOROUZI et al., 2008). Deste modo, devem ser obtidos genótipos melhorados geneticamente para serem mais tolerantes e experimentos com diferentes genótipos devem ser realizados visando detectar quais são os mais tolerantes.

Estratégias de manejo devem ser utilizadas para reduzir os riscos relacionados ao déficit hídrico. A adequação da data de semeadura é a primeira técnica de manejo a ser considerada, em que, a partir do conhecimento das características climáticas de cada região deve-se buscar datas de semeadura com menor probabilidade possível de ocorrência de déficit hídrico, especialmente no florescimento da canola. O manejo do solo deve ser planejado visando a descompactação e a adubação e calagem mais profunda, para que, se for preciso, a planta não encontre impedimentos físicos e químicos para o aprofundamento radicular, estratégia para explorar a umidade das camadas mais profundas do solo (THORUP-KRISTENSEN et al., 2021). O uso de genótipos tolerantes ao déficit hídrico deve ser escolhido caso a data de semeadura a ser utilizada tenha maior probabilidade de ocorrência de déficit hídrico na floração. Outra opção para evitar perdas

do potencial produtivo pelo déficit hídrico é o uso de irrigação, caso a propriedade possua alto nível tecnológico. Com o uso de irrigação Hergert et al. (2016) obtiveram rendimento de grãos de 3280 kg ha⁻¹ na Austrália, sendo este cinco a seis vezes superiores em comparação ao cultivo não irrigado durante os anos secos.

O excesso hídrico resulta em um estresse indireto, pela menor disponibilidade de oxigênio à raiz. Quando o solo é alagado, os níveis de difusão do O₂ na superfície da raiz decrescem drasticamente porque a maior parte dos espaços com ar que os poros do solo continha são preenchidos por água. Os principais efeitos adversos do excesso hídrico dependerão do estágio fenológico das plantas e da duração. No subperíodo de semeadura a emergência o alagamento do solo pode levar a inibição da germinação de sementes, já em estádios mais avançados o alagamento induz à redução do crescimento da parte aérea, senescência prematura das folhas e morte das plantas (PEZESHKI, 2001).

Estudando o efeito do alagamento durante 7 dias após a floração da colza, Xu et al. (2015) obtiveram resultados que mostraram que o estresse causado pelo alagamento afetou o crescimento da canola e causou redução de 30 a 41,9% da produtividade, dependendo do genótipo, quando comparadas ao tratamento controle, associando esse resultado a redução do comprimento médio da raiz principal. O desenvolvimento de raízes adventícias foi observado por Xu et al. (2015), Perboni et al. (2012) e Ploschuk et al. (2018), porém nenhum autor observou a formação de aerênquima. Perboni et al. (2012) também observaram que genótipos respondem diferentemente às inundações, sendo a Hyola 420 um dos genótipos menos sensíveis.

Para Tartaglia et al. (2018), o excesso hídrico de até 192 h contínuas no início da antese da canola pode causar redução de 30,7% no rendimento de grãos quando comparado ao tratamento controle (sem excesso de água). Porém, com somente 24 h de excesso hídrico, já há redução do número de síliquas por planta, matéria seca da parte aérea e o rendimento de grãos de canola. Também segundo Tartaglia (2016), mesmo em condição de excesso hídrico, a canola consegue atingir produtividades médias de 1.500 kg ha⁻¹, próximas à média nacional, denotando assim que a canola pode ser inserida em áreas de terras baixas, denominadas de várzeas no estado do Rio Grande do Sul, com resultados promissores.

Assim como para o déficit hídrico, algumas técnicas de manejo podem diminuir os efeitos nocivos do excesso hídrico na produtividade dos grãos da canola. A escolha da data de semeadura é fundamental para diminuir a probabilidade de ocorrência de excesso hídrico, principalmente na floração. O uso de cultivares com maior tolerância ao excesso

hídrico também pode ser uma alternativa para diminuir as perdas de produtividade. Em áreas com frequentes flutuações no nível do lençol freático na camada de solo onde ocorrem raízes ao longo do ciclo da canola, uma boa alternativa para manter o potencial de elevada produtividade é o uso de drenos (TARTAGLIA, 2016; SCHAEFER, 2021), assim como manejar o solo visando a sua descompactação, para que a água em excesso no solo consiga drenar mais rapidamente no perfil.

Sob condições favoráveis de disponibilidade de água, solo e correto manejo de cultivo e fitossanitário, a máxima produtividade de uma cultura agrícola vai depender principalmente da taxa de interceptação de radiação solar. A radiação solar é um dos fatores fundamentais para a fotossíntese, e toda produção potencial de biomassa vegetal depende dessa interceptação. A disponibilidade de radiação solar depende principalmente da época do ano e da latitude, em virtude da variação na declinação solar ao longo do ano e da nebulosidade (Varejão-Silva, 2006) e da nebulosidade. No outono-inverno do Rio Grande do Sul, em virtude do aumento do ângulo zenital da radiação solar e menor duração do dia, há uma diminuição da radiação solar interceptada pelo dossel de plantas pela sua menor disponibilidade (MÜLLER; BERGAMASCHI, 2005). Além disso, fatores relacionados às características dos genótipos, como o ângulo da folha e número de folhas, bem como condições meteorológicas e práticas de manejo, também podem influenciar a interceptação de radiação solar pelas plantas (RADIN et al., 2003).

Na fase vegetativa da canola, a interceptação de radiação solar é realizada principalmente pelas folhas, com uma pequena contribuição das hastes. Porém, a partir da fase reprodutiva, ocorre interceptação de radiação solar também pelas flores e síliquas (DALMAGO et al., 2009). Segundo Fochesatto et al. (2016), durante o estágio reprodutivo, a planta de canola consegue ter uma eficiência de interceptar cerca de 90% da radiação solar fotossinteticamente ativa incidente (RFA), sendo que as estruturas reprodutivas, como as síliquas e flores também são capazes de ter alta eficiência de interceptação de RFA. Além do crescimento das plantas, limitações na disponibilidade de radiação solar podem contribuir no abortamento de flores (DALMAGO et al., 2009).

O conhecimento da interação entre as variáveis meteorológicas e/ou ambientais, suas variabilidades e as técnicas adequadas de cultivo da canola podem auxiliar na melhoria do planejamento agrícola, possibilitando o alcance de maiores produtividades, redução dos custos e a diminuição de perdas por fatores ambientais.

2. ARTIGO 1 - QUOCIENTE FOTOTERMAL E PRODUTIVIDADE DA CANOLA EM CLIMA SUBTRIPICAL ÚMIDO

RESUMO: O quociente fototermal é um índice agrometeorológico que expressa a relação entre a radiação solar incidente e a soma térmica diária da planta. No entanto, sua equação original possui uma falha na estimativa, pois à medida que a temperatura média se aproxima da temperatura base, o quociente fototermal aumenta desproporcionalmente, o que resulta em erro na quantificação. O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da radiação solar e da temperatura do ar na produtividade de grãos da canola, por meio de um quociente fototermal original e modificado, além das respectivas modificações adicionais propostas neste trabalho. Foi utilizado um banco de dados contendo a produtividade de grãos e a fenologia de diferentes genótipos de canola cultivados em Passo Fundo, Santa Maria, Santo Ângelo e São Vicente do Sul, no estado do Rio Grande do Sul, em uma faixa de semeadura de março a agosto (2010-2019). Para diferentes subperíodos de desenvolvimento foi avaliada a relação entre a produtividade de grãos de canola e o quociente fototermal obtido pelo método proposto por Fischer e Dhillon e Ortiz-Monasterio e as suas modificações que incluíram o cálculo da soma térmica diária de acordo com o modelo de Wang e Engel. A metodologia proposta por Fischer e sua modificação pela soma térmica proporcionou maior correlação do quociente fototermal com a produtividade de grãos dos genótipos de canola no subperíodo compreendido entre o início e o final do florescimento, apresentando uma relação linear positiva. Maiores valores de quociente fototermal no subperíodo de início ao final da floração foram obtidos em semeaduras realizadas de 13 de maio a 15 de junho.

PALAVRA-CHAVES: (*Brassica napus* L. var. *oleifera*), radiação solar, temperatura do ar, soma térmica

PHOTOTHERMAL COEFFICIENT AND CANOLA YIELD S IN HUMID SUBTROPICAL CLIMATE

ABSTRACT: The photothermal coefficient is an agrometeorological index that expresses the relationship between incident solar radiation and the average air temperature minus the base temperature of the crop. However, his original equation has a flaw in the estimation, as the mean temperature approaches the base temperature, the photothermal coefficient increases disproportionately, which is certainly an error in quantification. The aim of this study was to evaluate the effect of solar radiation and air temperature, using a photothermal coefficient proposed by Fischer and Dhillon and by Ortiz-Monasterio, and the changes proposed in this work on canola yield. A database on grain yield and phenology of different canola genotypes was used, which were collected in the cities of Passo Fundo, Santa Maria, Santo Ângelo and São Vicente do Sul, in the state of Rio Grande do Sul, in a sowing range from March to August (2010-2019). The relationship between canola grain yield and photothermal coefficient was evaluated for different development sub-periods by the method proposed by Fischer and Dhillon and Ortiz-Monasterio and its modifications that included the calculation of the daily thermal sum according to the Wang model and Engel. The methodology proposed by Fischer and modified by the thermal sum provided a greater correlation of QF with the yield of the canola genotypes in the sub-period from beginning to end of flowering, showing a positive linear relationship between grain yield and the photothermal coefficient. Higher values of photothermal coefficient in the subperiod from beginning to end of flowering were obtained in sowing carried out from May 13 to June 15.

KEYWORDS: (*Brassica napus* L. var. *oleifera*), solar radiation, air temperature, thermal time

INTRODUÇÃO

Para a região Sul do Brasil, a canola surge como uma boa alternativa à diversificação de culturas no período de inverno, em rotação com o trigo. A canola, além de produzir grãos, é uma das poucas oleaginosas produzidas no inverno, garantindo renda ao produtor, pois geralmente os custos de produção são menores em comparação aos cereais de inverno e o preço de mercado é equiparado à cotação da soja (DE MORI et al., 2019; CONAB, 2021). Além disso, essa oleaginosa pode ocupar áreas agricultáveis que geralmente ficam ociosas no período de inverno.

A produtividade da canola depende das limitações impostas pelas condições meteorológicas, condições de manejo e das respostas produtivas relacionadas aos genótipos. Dentre os elementos meteorológicos que afetam diretamente o crescimento, desenvolvimento e produtividade da canola destacam-se a temperatura do ar, a radiação solar incidente e a precipitação pluvial (POKHAREL et al. 2020; GARCIA-HERNANDEZ et al., 2020; DRECCER et al., 2018). A temperatura do ar é um dos elementos meteorológicos que mais influencia a fenologia e o crescimento da canola (LUZ et al., 2012; THOMAS, 2003). Condições térmicas ótimas para o crescimento e boa produtividade da canola estão no intervalo de 13 a 22 °C (THOMAS, 2003). Para o clima mediterrâneo quente e semiárido do Irã, em uma faixa de semeadura de novembro a março, Faraji et al. (2009) encontraram relação linear negativa entre o aumento da temperatura do ar de 9 °C para 21 °C na fase de enchimento de grãos e a produtividade da canola, indicando que a canola é beneficiada por ambientes com a temperatura do ar entre 9 e 13 °C.

Quando sob condições favoráveis de água, solo e correto manejo fitossanitário, a máxima produtividade de uma cultura agrícola vai depender principalmente da taxa de interceptação de radiação solar. Segundo Nied et al. (2014), durante o estágio reprodutivo, a planta de canola consegue ter a eficiência de interceptar cerca de 90% da radiação solar fotossinteticamente ativa (RFA) incidente. Segundo os mesmos autores, as estruturas reprodutivas, como as siliquis e flores, também tem alta eficiência de interceptação de RFA. No entanto, sob condições normais de produção, é difícil atribuir o efeito da temperatura do ar e da radiação solar individualmente na produtividade da canola, devendo se buscar quociente que integrem os efeitos mútuos.

O quociente fototermal (QF), proposto por Fischer (1985) para a cultura do trigo, é a relação entre a radiação solar incidente e a temperatura média do ar menos a

temperatura base da cultura. É um índice agrometeorológico da produção vegetal, em que se pressupõe uma relação linear entre o crescimento de uma cultura e a radiação solar interceptada e entre a taxa de desenvolvimento e a temperatura do ar, para um subperíodo considerado crítico. No QF a radiação solar e a temperatura do ar são as forças motrizes para quantificar a taxa de produção e desenvolvimento, respectivamente, durante esta fase crítica. Maior radiação solar disponível e menor temperatura do ar no período crítico, alongam este subperíodo, o que permite uma maior assimilação de CO₂ e nutrientes, resultando em um maior número de grãos cheios por área (DRECCER et al., 2018). Porém, à medida que a temperatura média do ar se aproxima da temperatura base, o quociente fototermal aumenta de forma desproporcional, o que resulta em um significativo erro para mais na quantificação. Para superar esse efeito em baixas temperaturas, Dhillon e Ortiz-Monasterio (1993) propuseram uma modificação no método de cálculo do QF, inserindo critérios, conforme a temperatura média diária do ar. Um ponto em comum nos dois métodos é a pressuposição da linearidade constante entre a temperatura do ar e o crescimento e desenvolvimento vegetal, o que não é realístico do ponto de vista biológico, fazendo-se necessário outros ajustes. Além do trigo (CUNHA et al., 2005; FISCHER, 1985), o QF já foi utilizado para descrever respostas produtivas da soja (ZANON et al., 2016), grão-de-bico (SADRAS et al., 2015) e para a canola na Austrália (DRECCER et al., 2018), mas não há trabalhos visando descrever as respostas produtivas da canola na região Sul, que concentra a produção no Brasil.

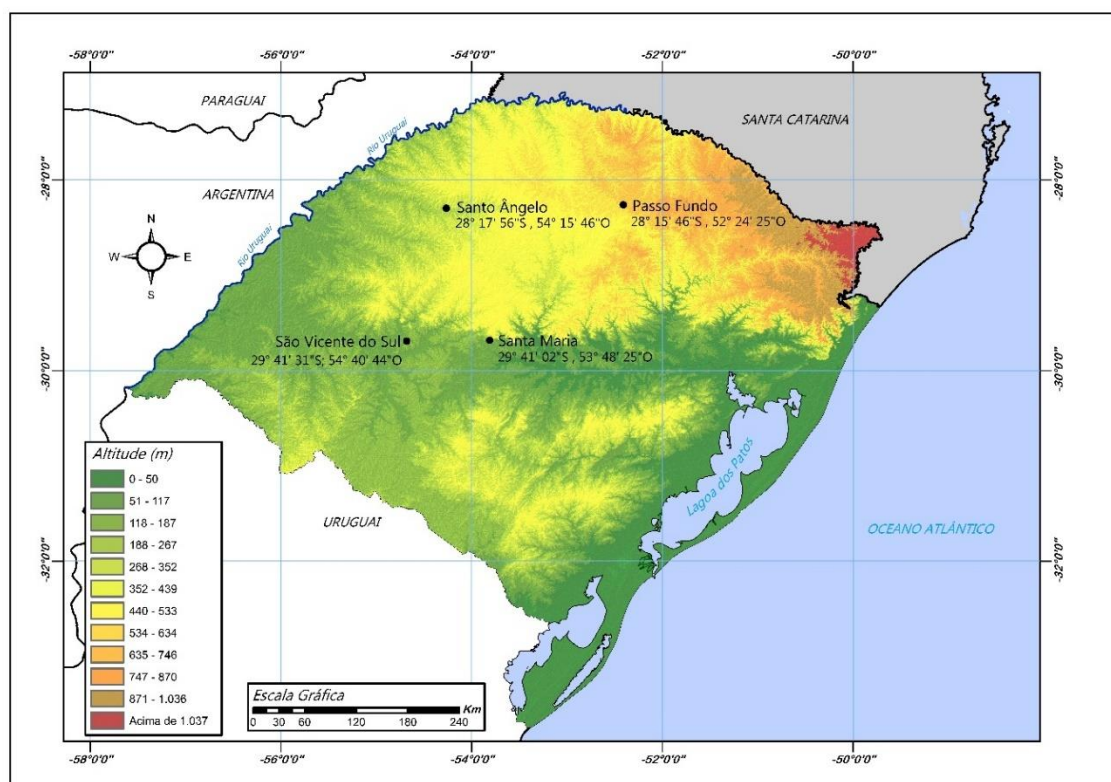
Para propor uma solução desse problema, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da radiação solar e da temperatura do ar na produtividade da canola por meio do quociente fototermal proposto originalmente e com modificações e determinar em qual subperíodo reprodutivo esse quociente tem melhor correlação com a produtividade da canola.

MATERIAL E MÉTODOS

Utilizaram-se os dados de 22 experimentos realizados nas áreas experimentais da EMBRAPA Trigo localizada em Passo Fundo, do Instituto Federal Farroupilha Campus São Vicente do Sul, do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria e do Instituto Federal Farroupilha Campus Santo Ângelo, sendo os quatro municípios localizados no Rio Grande do Sul (RS), em diferentes condições de altitude (Figura 1). Os municípios apresentam clima Subtropical úmido (Cfa), conforme

classificação de Köppen (KUINCHTNER; BURIOL, 2001). Em Santa Maria e São Vicente do Sul o solo das áreas experimentais é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico Arênico, em Santo Ângelo como Latossolo Vermelho Distroférico típico e em Passo Fundo como Latossolo Vermelho Distrófico húmico (EMBRAPA, 1999).

Figura 1– Mapa de altitude do Rio Grande do Sul com indicação dos municípios de Passo Fundo, Santa Maria, São Vicente do Sul e Santo Ângelo, onde foram obtidos os dados experimentais de fenologia e produtividade de genótipos de canola em diferentes datas de semeadura.



Os dados disponíveis foram obtidos de experimentos em que houve um padrão de execução, com a utilização de delineamento em blocos ao acaso, com parcelas subdivididas, com repetições variando de três a quatro e arranjo fatorial entre genótipos e datas de semeadura. O tamanho de cada unidade experimental variou de 6 m² à 18 m². Espaçamentos entre linhas de plantas de 0,3m a 0,4 metros foram utilizados, mantendo-se a população de 40 plantas por metro quadrado, sendo ela ajustada por desbaste quando a densidade inicial foi maior do que a indicada. A adubação foi realizada baseada na indicação do manual de adubação e calagem para os Estados do RS e SC, conforme a análise do solo e a necessidade da cultura da canola (SQFS, 2016). Com relação ao controle de pragas, doenças e plantas daninhas, foram aplicados os produtos disponíveis

recomendados para cultura, somente quando se identificou a necessidade. No caso de plantas daninhas, em alguns anos foi realizada a capina manual nos experimentos.

Considerando cada data de semeadura um ambiente diferente, foram obtidas 96 interações genótipo e ambiente, que retrataram uma ampla gama de condições ambientais (Tabela 1). Foram avaliados os genótipos Alht M6, Alht B4, Diamond, Hyola 433, Hyola 61 e Nuola 300. Nos ambientes avaliados, o período de florescimento dos diferentes genótipos variou de 18 a 66 dias, devido principalmente às diferentes condições térmicas de exposição da canola em função das diferentes datas de semeaduras, altitude e continentalidade dos locais. Em relação aos diferentes locais foi optado por não separar os dados, pois todos estão localizados em uma faixa de 1,25° de latitude geográfica e, portanto, a radiação solar incidente é potencialmente semelhante.

Tabela 1 - Ano de cultivo, local, datas de semeadura e genótipos de canola semeados em Passo Fundo (PF), Santa Maria (SM), São Vicente do Sul (SVS) e Santo Ângelo (SA).

Ano	Local	Datas de semeadura	Genótipos
2010	PF	13/05 e 08/07	Hyola 61
2011	PF	15/05 e 10/06	Hyola 61
2014	PF	23/04/, 29/05 e 16/07	Hyola 61
2016	PF	07/04/, 15/04, 02/05, 18/05, 03/06 e 15/06	Alht M6, Diamond e Hyola 61
2016	SVS	20/06	Diamond
2017	PF	08/04 e 02/05	Alht M6, Diamond e Hyola 61
2017	PF	19/04	Alht B4, Alht M6, Diamond, Hyola 61 e Hyola 433
2017	PF	22/05	Diamond
2017	PF	16/06	Diamond
2017	SVS	12/04	Diamond e Hyola 433
2017	SVS	03/05, 12/06 e 31/07	Hyola 61 e Hyola 433
2018	PF	19/04, 10/05, 30/05 e 20/06	Diamond e Hyola 433
2018	PF	11/07	Diamond e Hyola 433
2018	PF	01/08	Alht B4, Diamond e Hyola 433
2018	SVS	06/08	Diamond e Hyola 433
2019	SM	14/03, 11/04, 20/05, 11/06	Alht B4, Diamond e Hyola 433
2019	SM	08/07	Alht B4, Diamond, Hyola 433 e Nuola 300
2019	SVS	22/03	Alht B4, Hyola 433 e Nuola 300
2019	SVS	16/05	Hyola 433 e Nuola 300
2019	SVS	10/04	Alht B4
2019	SVS	08/06 e 09/07	Alht B4 e Nuola 300
2019	AS	24/04 e 16/05	Alht B4, Diamond, Hyola 433 e Nuola 300
Total = 96 interações genótipo x ambiente			

Durante o ciclo de desenvolvimento das plantas, foram observados e datados os eventos fenológicos, seguindo a escala descrita por Iriarte e Valetti (2008). No estágio de

maturação fisiológica, foram colhidas plantas de 2 a 6,75 metros lineares para a avaliação da produtividade de grãos de canola.

A relação entre a produtividade de grãos de canola (kg ha^{-1}) e o quociente fototermal (QF) foi avaliada para diferentes subperíodos a fim de verificar em qual a canola é mais sensível a esse quociente. Os subperíodos testados foram: de 15 dias antes do início do florescimento até 15 dias após o início florescimento; 10 dias antes do início do florescimento até 15 dias após o início do florescimento; 5 dias antes do início do florescimento até 15 dias após o início do florescimento; início do florescimento até 15 dias após o início do florescimento; início do florescimento ao final do florescimento. Os métodos para a estimativa do quociente fototermal utilizados foram o método proposto por Fischer (1985), equacionado por:

$$\text{QF} = \text{Rad}/(\text{Tméd} - \text{Tb}) \quad (1)$$

$$\text{se a } \text{Tméd} \leq \text{Tb} \text{ então, } \text{QF} = 0 \quad (2)$$

e a alteração do método de Fischer (1985), proposta por Dhillon e Ortiz-Monasterio (1993):

$$\text{se a } \text{Tméd} > 10 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ então } \text{QF} = \text{Rad}/ \text{Tméd} \quad (3)$$

$$\text{se a } \text{Tméd} \leq \text{Tb} \text{ então } \text{QF} = 0 \quad (4)$$

$$\text{se } \text{Tb} < \text{Tméd} \leq 10 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ então } \text{QF} = \text{Rad} / 5,5 * ((\text{Tméd} - \text{Tb})/5,5) \quad (5)$$

em que: QF é o quociente fototermal diário ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$);

Rad é a radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

Tméd é a temperatura média diária $(\text{Tmax} + \text{Tmin}) / 2$ (em $^\circ\text{C}$);

Tb é a temperatura basal inferior, que para a canola é $5 \text{ }^\circ\text{C}$ (NANDA et al., 1995).

Uma modificação foi realizada tanto na equação de Fischer (1985) quanto na de Dhillon e Ortiz-Monasterio (1993), efetuando-se uma substituição na parte em comum das duas equações, Tméd-Tb. Para isso foi utilizado o cálculo da soma térmica diária (STd, $^\circ\text{C dia}$) de acordo com o modelo de Wang e Engel (1998), que utiliza uma função de resposta das plantas não linear à temperatura do ar. A função de temperatura f(T) nesse caso é uma função beta que varia de zero a um, sendo definida como (STRECK et al., 2003; WANG; ENGEL, 1998):

$$f(T) = [2(\text{Tméd}-\text{Tb})^\alpha (\text{Tot}-\text{Tb})^\alpha - (\text{Tméd}-\text{Tb})^{2\alpha}] / (\text{Tot}-\text{Tb})^{2\alpha} \quad (6)$$

$$\text{se a } \text{Tméd} < \text{Tb} \text{ ou } \text{Tméd} > \text{TB}, \text{ então } f(T) = 0 \quad (7)$$

$$\text{se a } T_b \leq T_{\text{méd}} \leq T_B, \text{ então } \alpha = \ln 2 / \ln[(T_B - T_b) / (T_{\text{ót}} - T_b)] \quad (8)$$

$$\text{Nesse caso, } ST_a = f(T) \cdot (T_{\text{ót}} - T_b) \quad (9)$$

em que: $T_{\text{ót}}$ é a temperatura ótima, que para a canola é 21°C (MORRISON, 1993), e, T_B é a temperatura base superior, que para a canola é 27°C (BATTISTI et al., 2013; MORRISON, 1993).

A partir dos valores diários de QF foram calculadas as médias para os subperíodos estudados. Os dados de temperatura do ar e radiação solar incidente foram adquiridos das estações meteorológicas automáticas pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os municípios de Santa Maria, São Vicente do Sul e Passo Fundo contam com estações meteorológicas automáticas. Já Santo Ângelo não possui estação meteorológica, mas o município vizinho, São Luiz Gonzaga, conta com uma estação meteorológica automática distante cerca de 74 km (lat.: 28°25'S; long.: 52°58'W; alt. 245 m), situando-se, portanto, a menos da metade do limite da área de abrangência (< 150 km) e a uma diferença de altitude de apenas 36 metros.

Os dados de produtividade de grãos e do QF proposto por Fischer (1985), QF proposto por Fischer (1985) com modificação da soma térmica (Fischer ST), QF proposto Dhillon e Ortiz-Monasterio (1993) (DOM) e o QF proposto por Dhillon e Ortiz-Monasterio (1993), modificado pelo uso da ST (DOM ST) para os três grupos de genótipos e os subperíodos avaliados, foram submetidos ao modelo de correlação simples de Pearson para obtenção da magnitude e o sentido de associações entre as variáveis estudadas. A significância das correlações foi avaliada a 5% de probabilidade de erro pelo teste t. Com os dados do modelo de QF que obteve maior correlação com a produtividade de cada grupo de genótipo de canola e o subperíodo com maior correlação, foi analisada a relação entre a produtividade e o QF através de regressões lineares. Uma equação polinomial foi ajustada aos QF máximos e a data de semeadura. Para isso, valores máximos de QF para períodos de 10 dias foram selecionados para comporem a regressão entre as duas variáveis.

Os valores do coeficiente de correlação Pearson foram categorizados de acordo com o sugerido por Jacques Callegari (2009) (Tabela 2).

Tabela 2 - Valores do coeficiente de correlação de Pearson

Coeficiente de correlação	Classificação
$r = 0$	Nula
$0 < r \leq 0,3$	Fraca
$ 0,3 < r \leq 0,6 $	Moderada
$ 0,6 < r \leq 0,9 $	Forte
$ 0,9 < r < 1 $	Muito Forte
$r = 1$	Perfeita

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As 42 datas de semeadura nos diferentes locais proporcionaram a exposição dos genótipos de canola a diferentes condições ambientais no decorrer do ciclo de desenvolvimento, principalmente, no que se refere à temperatura do ar e radiação solar incidente. Essas condições distintas auxiliam no melhor entendimento da resposta produtiva da canola às condições fototermais.

Observando as correlações de Pearson, verifica-se que os diferentes métodos de cálculo do quociente fototermal correlacionaram-se de maneira diferente com a produtividade dos genótipos de canola nos diferentes subperíodos avaliados (Tabela 3). Na maioria dos casos, percebe-se que a modificação da soma térmica proporciona aumento do coeficiente de correlação. Evidencia-se assim, que a canola se beneficia de condições de baixas temperaturas do ar, mas não abaixo da temperatura base, e de alta disponibilidade de radiação solar durante o período de pré-floração até o final da floração, resultando em alta taxa fotossintética, e conforme os resultados, pode-se inferir que os fotoassimilados foram convertidos em fonte para o enchimento de grãos.

Tabela 3 - Coeficiente de correlação simples de Pearson entre o quociente fototermal(QF) proposto por Fischer (1985), QF proposto por Fischer (1985) com modificação pelo uso da soma térmica (Fischer ST), QF proposto Dhillon e Ortiz-Monasterio (1993) (DOM) e o QF proposto por Dhillon e Ortiz-Monasterio (1993), modificado pelo uso da ST (DOM ST) com a produtividade de grãos de canola, nos diferentes períodos compreendidos entre a pré-antese até o final do florescimento.

Método	Nuola 300 n=7	Diamond n=27	Alht B4 n=13	Hyola 433 n=21	Alht M6 n=9	Hyola 61 n=19
15 dias antes e 15 dias após o início do florescimento						
Fischer	0,43*	0,53*	0,49*	0,48*	0,54*	0,55*
Fischer ST	0,44*	0,55*	0,47*	0,50*	0,56*	0,60*
DOM	0,38*	0,25 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,25 ^{ns}
DOM ST	0,41*	0,16 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,26 ^{ns}
10 dias antes e 15 dias após o início do florescimento						
Fischer	0,44*	0,64*	0,54*	0,52*	0,55*	0,60*
Fischer ST	0,45*	0,75*	0,59*	0,53*	0,62*	0,77*
DOM	0,40 ^{ns}	0,59*	0,24 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,15 ^{ns}
DOM ST	0,42*	0,62*	0,26 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,23 ^{ns}
5 dias antes e 15 dias após o início do florescimento						
Fischer	0,61*	0,65*	0,60*	0,53*	0,68*	0,63*
Fischer ST	0,60*	0,75*	0,68*	0,67*	0,77*	0,75*
DOM	0,49*	0,53*	0,22 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,43*
DOM ST	0,45*	0,59*	0,25 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,45*
Início do florescimento até 15 dias após o início do florescimento						
Fischer	0,64*	0,68*	0,59*	0,54*	0,62*	0,63*
Fischer ST	0,66*	0,72*	0,67*	0,65*	0,68*	0,74*
DOM	0,48*	0,52*	0,26 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,47*
DOM ST	0,43*	0,48*	0,28 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,45*
Início do florescimento ao final do florescimento						
Fischer	0,72*	0,78*	0,62*	0,57*	0,72*	0,68*
Fischer ST	0,72*	0,79*	0,69*	0,68*	0,81*	0,80*
DOM	0,46*	0,65*	0,23 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,44*	0,46*
DOM ST	0,45*	0,58*	0,18 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,45*	0,47*

* Significativo em 5% de probabilidade de erro, pelo teste t. ns Não significativo

A determinação de um período crítico de sensibilidade da canola ao quociente fototermal é de extrema importância, pois tem impacto na produtividade de grãos e pode ser relacionada a práticas de manejo visando maximizá-la e ao melhoramento genético. Dentre os subperíodos avaliados, o que apresentou maior correlação entre o quociente

fotothermal e a produtividade da canola foi o subperíodo compreendido entre o início e o final do florescimento (Tabela 3).

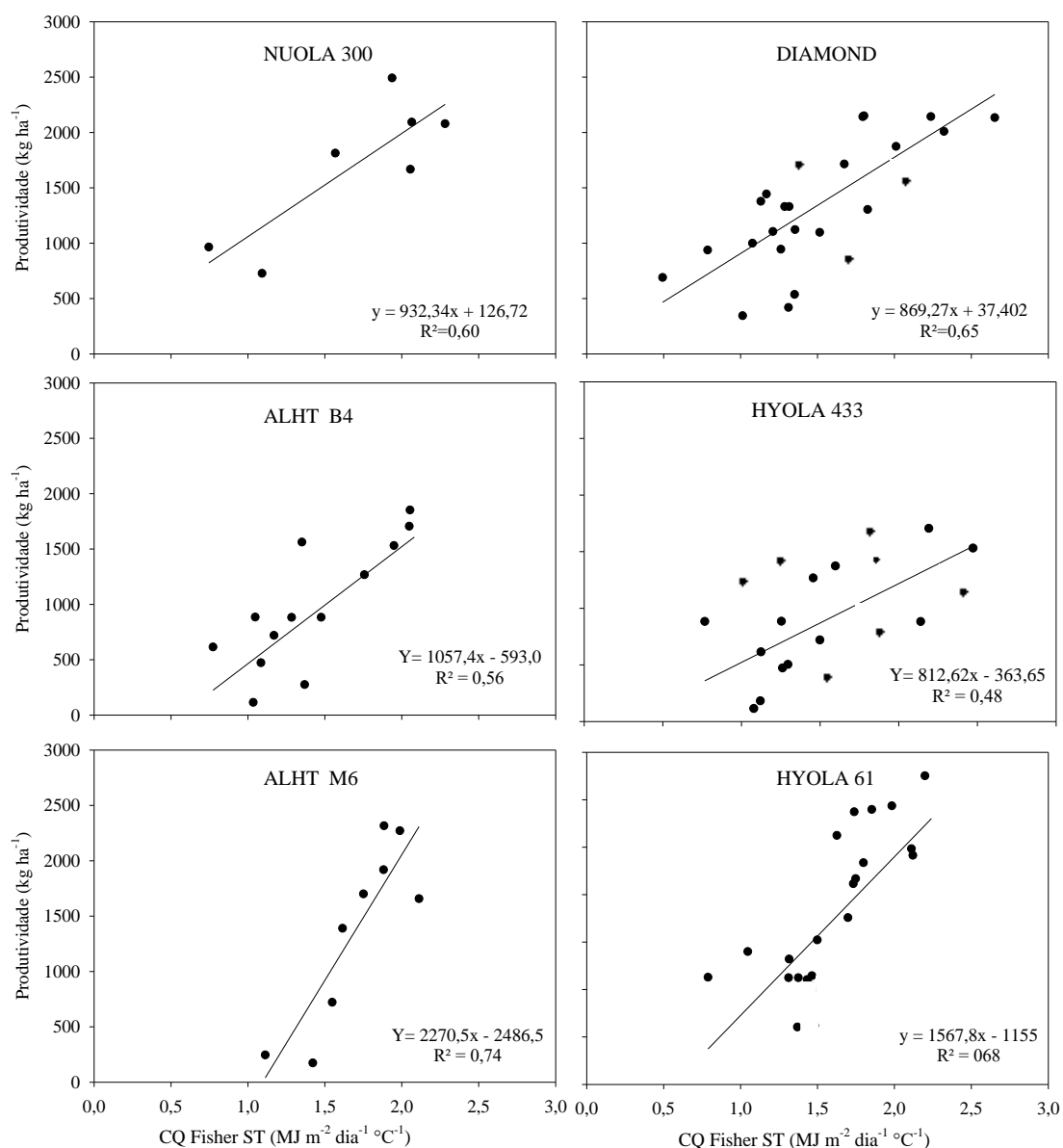
O período pré-floração também apresentou forte correlação com o quociente fotothermal, pois esse subperíodo é crítico, podendo causar redução da fertilidade e diminuir conseqüentemente o número de silíquas por planta. A cultura da canola tem como particularidade a ocorrência de processos fisiológicos e morfológicos sobrepostos no florescimento, incluindo o crescimento de ramos, flores, silíquas e enchimento de grãos. No enchimento de grãos ocorre a expansão do tegumento do grão com endosperma líquido, crescimento do embrião e aumento do teor de óleo. Deste modo a redução de assimilados pós-antese, devido a altas temperaturas do ar e restrição de radiação solar, podem reduzir a massa dos grãos e o teor de óleo, limitando a produtividade dos grãos. De acordo com Sadras e Dreccer (2015), o período de final da floração e enchimento de grãos é um período crítico para estresses hídricos e térmicos na canola, demonstrando alta correlação com perdas de produtividade, evidenciando que a canola é mais próxima das respostas das leguminosas do que dos cereais em relação aos estresses. Segundo esses autores, as leguminosas possuem a janela de sensibilidade ao estresse deslocado para estágios posteriores de desenvolvimento em comparação com cereais, possivelmente relacionado ao hábito indeterminado e capacidade de compensar o número de sementes por vagem até mais tarde no ciclo da cultura, semelhante ao que ocorre com a canola. Dreccer et al. (2018), também consideraram o período após o início do florescimento o mais sensível para a definição da produtividade, devido a sobreposição do florescimento ao crescimento das silíquas, em trabalho avaliando a resposta da canola a estresses hídricos e térmicos na Austrália. Avaliando a exposição da canola ao sombreamento em diferentes subperíodos, Kirkegaard et al. (2018) concluíram que o período crítico teve duração média de 400 a 500 °C dia após o início da floração, período que coincide com o momento em que o número máximo de botões florais sensíveis e flores recém-abertas estão presentes.

De modo geral, a utilização da metodologia proposta por Fischer, modificada ou não pela ST, resultou na obtenção de significância para todos os genótipos em todos os subperíodos avaliados (Tabela 3). Para a metodologia de Fisher modificada pela ST no subperíodo de início ao final do florescimento, se obteve correlação positiva, maior que 0,6, para todos os genótipos no período do início ao final do florescimento, demonstrando alta correlação desse índice bioclimático com a produtividade da canola. A maior correlação da produtividade com o QF pela metodologia de Fisher modificada pela ST

demonstrou que o crescimento da canola não tem uma relação completamente linear com a temperatura do ar, reduzindo tanto com baixas temperaturas quanto com altas temperaturas do ar. A metodologia proposta por Dhillon e Ortiz-Monasterio (1993) e sua modificação pela ST resultaram nas mais baixas correlações com a produtividade da canola. Deste modo, esses métodos não são os mais indicados, embora possa haver variabilidade em função das condições hídricas nos diferentes solos das quatro localidades. Rondini e Zugastty (2009) obtiveram alta associação entre o QF proposto por Fischer e o QF proposto Dhillon e Ortiz-Monasterio, concluindo que os dois métodos poderiam ser utilizados indistintamente para o cálculo do QF. No entanto, eles preferiram utilizar o método de Fischer, por ser considerado mais simples.

A partir do subperíodo que demonstrou ser o mais responsivo ao quociente fototermal, e do método que demonstrou maior correlação com a produtividade de grãos de canola, as regressões do QF com a produtividade resultou em funções lineares positivas para todos os genótipos avaliados, isto é, com o aumento do QF há um aumento da produtividade de grãos de canola (Figura 2). Apesar de ser um índice agrometeorológico desenvolvido para a cultura do trigo, a relação linear positiva com o QF também foi encontrada para concentração de sólidos solúveis totais em melão (BOUZO et al. 2015), para a produtividade de grãos da soja (ZANON et al. 2016) e para a produtividade de grão-de-bico (SADRAS; DRECCER, 2015). Cultivando a canola em diferentes regiões da Austrália, Dreccer et al. (2018) não encontraram associação entre a produtividade de grãos e o quociente fototermal com a metodologia proposta por Fischer. Porém, encontraram com uma modificação no quociente fototermal de Fisher corrigido pelo déficit médio de pressão de vapor do ar, principalmente no início do florescimento, sendo considerado como um índice agrometeorológico confiável para discriminação de produtividade. Nesse caso, o déficit médio de pressão de vapor do ar (d), possivelmente representa a demanda atmosférica, podendo-se inferir que “ d ” possa estar associado ao gradiente hídrico na folha.

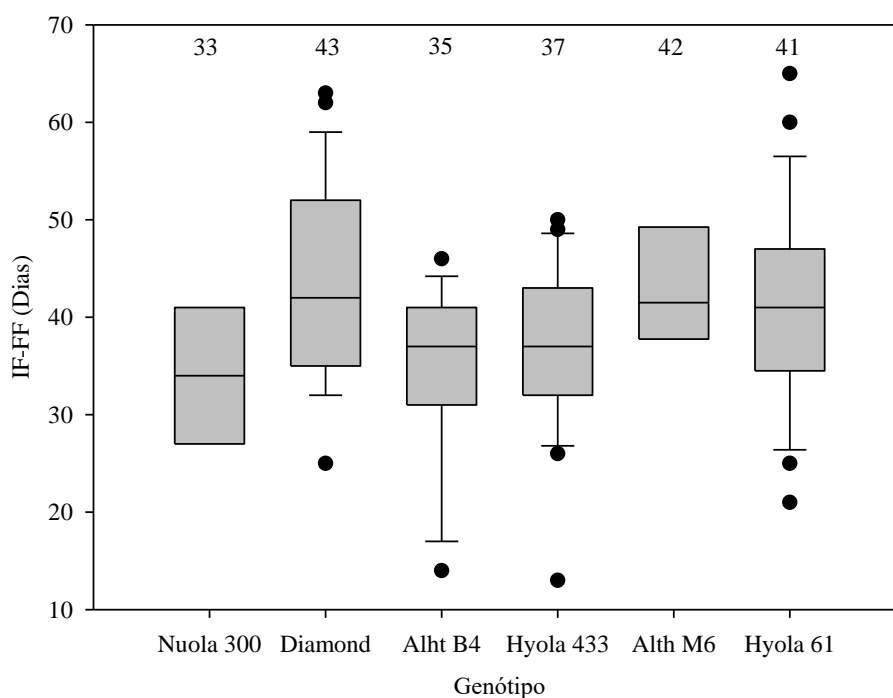
Figura 2 - Regressões lineares entre o quociente fototermal proposto por Fischer, modificado pela soma térmica (QF Fischer ST) no subperíodo de início ao final do florescimento e a produtividade de grãos da canola para genótipos Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61.



O grau de dispersão dos dados de QF e produtividade de grãos de canola foi distinto para cada genótipo. De acordo com a medida de qualidade do ajuste, obtida através do quociente de determinação (R^2), com os modelos de regressão linear, se pode inferir que o QF explica de 48 a 74% da variabilidade da produtividade de grãos de canola. Essas informações indicam que o QF é um quociente agrometeorológico que pode ser relacionado com a produtividade da canola e que pode ser usado para ajustar o manejo atual da canola no sul Brasil.

Os genótipos Diamond, Alht M6 e Hyola 61 foram os que demonstraram maior sensibilidade ao quociente fototermal, devido principalmente, à maior duração do subperíodo de florescimento (Figura 3). O quociente angular da equação nos permite deduzir que, cada um décimo de aumento do QF, representa um aumento de 86,9, 227,5 e 156,8 kg ha⁻¹ na produtividade de grãos de canola para os genótipos Diamond, Alht M6 e Hyola 61, respectivamente.

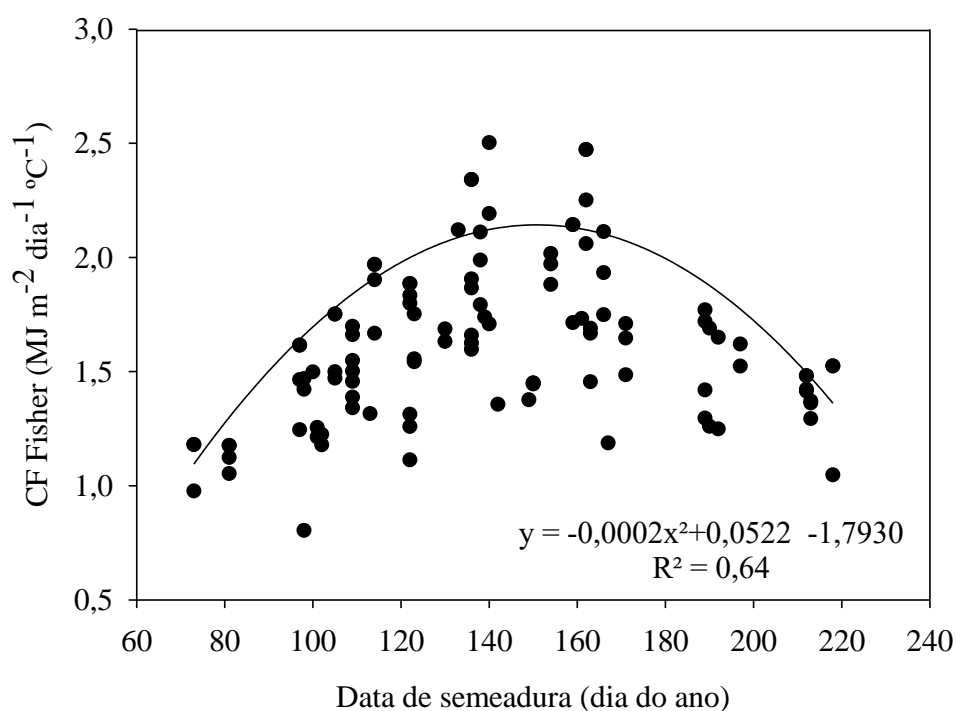
Figura 3 - Variabilidade, mediana e média (valores) da duração do subperíodo de início ao final do florescimento, em dias, para os genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019.



A escolha adequada da data de semeadura é uma prática de manejo eficaz para a maximização do potencial produtivo das culturas, sem que haja um aumento nos custos de produção. Essa prática de manejo é considerada a de maior impacto sobre o rendimento das culturas, pois com ela são alteradas as relações hídricas, a temperatura do solo e do ar e a radiação solar incidente ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, buscando-se maior eficiência de produção. Torna-se necessário escolher datas de semeadura que permitam coincidir o subperíodo de início ao final do florescimento da cultura da canola com o maior QF, para assim maximizar as chances de atingir o potencial de rendimento da cultura. Nesse sentido, produtividades superiores à 2000 kg ha⁻¹ foram encontradas

quando o QF atingiu valores médios superiores a $1,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, no subperíodo de início ao final do florescimento. Para as quatro localidades estudadas, os valores de QF maiores que $1,8 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ foram encontrados no período de floração para datas de semeadura desde 13 de maio a 15 de junho, correspondendo aos dias 133 a 166 do ano (Figura 4). De acordo com o zoneamento agrícola de risco climático para a cultura da canola no estado do Rio Grande do Sul, para solos arenosos, a data final recomendada para a semeadura é 31 de maio, devido principalmente a probabilidade de ocorrência de déficit hídrico no subperíodo reprodutivo (BRASIL, 2021). No entanto, no caso de o produtor rural utilizar um nível tecnológico mais alto, contando com uma possível irrigação suplementar, a canola poderia ser semeada em um período mais amplo, facilitando as práticas de manejo e de colheita e potencializando a produtividade pelos maiores índices de QF em caso de semeaduras até metade de junho.

Figura 4 - Relação entre o quociente fototermal proposto por Fischer, modificado pela soma térmica (QF Fischer ST) para o subperíodo compreendido entre o início e o final do florescimento e respectivas datas de semeadura, expressas em dia do ano, para quatro locais e 7 anos de experimentos, totalizando 96 interações entre genótipo de canola e ambiente.



CONCLUSÕES

O quociente fototermal pode ser aplicado para as regiões desse estudo e para os genótipos testados, visando propor estratégias que visem a potencialização da produtividade da canola.

O subperíodo do início ao final do florescimento demonstra maior sensibilidade da produtividade ao quociente fototermal.

O método proposto por Fischer, modificado pela soma térmica, proporcionou maior correlação do quociente fototermal com a produtividade de todos os genótipos testados.

Há uma relação linear positiva da produtividade de grãos de canola com o quociente fototermal em todo o subperíodo de florescimento.

Maiores valores de quociente fototermal no subperíodo de florescimento foram obtidos em semeaduras realizadas de 13 de maio a 15 de junho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

BOUZO, C. et al. Cociente fototermal en melón y su relación con la concentración de azúcares en los frutos. **Scientia Agropecuaria**, v. 6, n. 3, p. 217-221, 2015.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Tradução. [s.l.] Artmed Editora, 2009, 264p.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Custos de Produção - Culturas de Inverno - safra 2019**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/custos-de-producao/planilhas-de-custo-de-producao/itemlist/category/403-planilhas-de-custos-de-producao-culturas-de-inverno>. Acesso em: 15 abr. 2022.

CQFS – Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de calagem e adubação para os Estados de Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016, 376p.

CUNHA, G. R. et al. Variabilidade temporal e espacial do quociente fototermal no Rio Grande do Sul e suas implicações para a expressão do potencial de rendimento de grãos de trigo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 1, p. 91-101, 2005.

DE MORI, C. et al. **Estimativas de custo operacional de produção de canola, safras 2015 a 2018, no norte do estado do Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2019. 12 p. (Embrapa Trigo. Circular Técnica 41). Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/205198/1/ID44767-2019CTO41.pdf>>. Acesso em 05 ago. 2022.

DHILLON, S.S.; ORTIZ-MONASTERIO, J.I. **Effects of date of Sowing on the yield and yield components of spring wheat and their relationship with solar radiation and temperature at Ludhiana, Punjab, India**. Wheat special Report 23b. 1993.

DRECCER, M. F. et al. Comparison of sensitive stages of wheat, barley, canola, chickpea and field pea to temperature and water stress across Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 248, p. 275-294, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

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

FISCHER, R.A. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. **Journal of Agricultural Science**, v. 105, p. 447-461, 1985.

GARCIA-HERNANDEZ, G. et al. Changes in the physiological and numerical components of canola yield in the face of reductions in incident solar radiation. **Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas**, v. 11, n. 5, p. 1083-1096, 2020.

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

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

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas**, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2001.

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

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

NANDA, R. et al. Development of *Brassica campestris*, *B. juncea*, *B. napus* and *B. carinata* grown in controlled environments and from 14 sowing dates in the field. **Field Crops Research**, n.46, p.93-103, 1996.

NIED, A.H. et al. Eficiência de interceptação de radiação solar por estruturas vegetativas e reprodutivas da canola. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE CANOLA, 2014,

Passo Fundo, RS. **Anais...** Passo Fundo, 2014. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/slac/cd/pdf/Astor_NIED>. Acesso: 04 jul. 2020.

POKHAREL, M. et al. High night-time temperature during flowering and pod filling affects flower opening, yield and seed fatty acid composition in canola. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 206, n. 5, p. 579-596, 2020.

SADRAS, V.O. et al. Unscrambling confounded effects of sowing date trials to screen for crop adaptation to high temperature. **Field Crops Research**, v. 177, p. 1-8, 2015.

STRECK, N. A. et al. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 115, n. 3/4, p. 139-150, 2003.

THOMAS, P. **Canola grower's manual**. Winnipeg: Canola Council of Canada. 2003. Disponível em: <http://www.canolacouncil.org/canola_growers_manual.aspx>. Acesso em 20 mai. 2022.

WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, v. 58, n. 1, p. 01-24, 1998.

ZANON, A.J. et al. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1447– 1454, 2016.

3. ARTIGO 2 – CONDIÇÕES AMBIENTAIS NO FLORESCIMENTO E A PRODUTIVIDADE MÁXIMA DA CANOLA EM CLIMA SUBTROPICAL

RESUMO: A canola é uma cultura de outono/inverno de grande potencial na região Sul do Brasil, porém a sua produtividade pode ser muito maior e o risco em seu cultivo diminuído, se compreendidas as condições ambientais adversas que podem ocorrer no ciclo de desenvolvimento das plantas. A relação das condições do ambiente com a produtividade das culturas agrícolas, é essencial para a análise da variabilidade do desempenho de genótipos e para o planejamento espacial e temporal da cultura. Deste modo, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito das variáveis ambientais na produtividade máxima da canola em clima subtropical. Um banco de dados sobre a produtividade e a fenologia de diferentes genótipos de canola foram coletados em Passo Fundo, Santa Maria, Santo Ângelo e São Vicente do Sul, municípios do Rio Grande do Sul, em uma faixa de semeadura de março a agosto (2010-2019). Funções limites foram ajustadas para a relação entre a produtividade máxima de grão de canola e a radiação solar, duração do subperíodo do início ao final do florescimento, data de semeadura, variáveis térmicas e hídricas no subperíodo do início ao final do florescimento. A produtividade máxima da canola é influenciada pela radiação solar, condições térmicas e hídricas no subperíodo de início de florescimento ao final do florescimento. A cada mm de déficit hídrico no subperíodo de início de florescimento ao final do florescimento ocorre perda de potencial de produtividade de aproximadamente 30,6 kg ha⁻¹. Máximas produtividades de grãos de canola foram obtidas em semeaduras realizadas de desde 24 de maio a 15 de junho.

PALAVRA-CHAVES: (*Brassica napus L. var. oleifera*), balanço hídrico, data de semeadura.

ENVIRONMENTAL CONDITIONS AT FLOWERING AND MAXIMUM PRODUCTIVITY OF CANOLA IN SUBTROPICAL CLIMATE

ABSTRACT: Canola is an autumn/winter crop of great potential in the southern region of Brazil, but its productivity can be much higher and the risk in its cultivation reduced, if the adverse environmental conditions that can occur in the plant development cycle are understood. The relationship of environmental conditions with the productivity of agricultural crops is essential for the analysis of the variability of genotype performance and for the spatial and temporal planning of the crop. Thus, the objective of this work was to evaluate the effect of environmental variables on the maximum yield of canola in a subtropical climate. A database on yields and phenology of different canola genotypes were collected in Passo Fundo, Santa Maria, Santo Ângelo and São Vicente do Sul, municipalities of Rio Grande do Sul, in a sowing range from March to August (2010 - 2019). Limit functions were adjusted for the relationship between maximum canola grain yield and solar radiation, duration of the subperiod from beginning to end of flowering, sowing date, thermal and water variables in the subperiod from beginning to end of flowering. The maximum yield of canola is influenced by solar radiation, thermal and water conditions in the sub-period from beginning to flowering to the end of flowering. For each mm of water deficit in the sub-period from beginning to flowering to the end of flowering, there is a loss of productivity potential of approximately 30.6 kg ha⁻¹. Maximum yields of canola grains were obtained in sowings carried out from May 24 to June 15.

KEYWORDS: (*Brassica napus* L. var. *oleifera*), water balance, sowing date.

INTRODUÇÃO

Tendo em vista que a canola tem potencial de produzir 3500 kg ha⁻¹ de grãos no Brasil (SANCHES et al., 2014), a produtividade média brasileira em torno de 1399 kg ha⁻¹ (CONAB, 2022), demonstra que há muito no que melhorar. A produtividade final de grãos é resultante de uma série de fatores que afetam o crescimento e o desenvolvimento das plantas, como por exemplo, a disponibilidade hídrica, a temperatura do ar e a radiação solar incidente e quando um ou mais elementos meteorológicos ocorrem em uma faixa fora da considerada ótima para a cultura, podem causar reduções significativas à produtividade de grãos.

O cultivo da canola também é considerado de risco, principalmente pelos estresses ambientais que ocorrem durante seu cultivo, como altas temperaturas do ar até o final da floração (DRECCER et al., 2018). A ocorrência de geadas no início da fase vegetativa (KOVALESKI et al., 2020) podem gerar perdas de população de plantas, e geadas no período de florescimento geram perdas pelo abortamento de flores e siliquis e aumentam a desuniformidade na maturação (DALMAGO et al., 2010). Atualmente, o cultivo da canola ainda é restrito no território brasileiro, sendo o estado do Rio Grande do Sul responsável por mais de 98% da área. Deste modo, redução na produção da canola no Rio Grande do Sul trazem alto impacto na produtividade média brasileira. Reduções de produção da canola em razão da ocorrência de adversidades climáticas são frequentes, como, por exemplo, no ano de 2017, em que uma série de eventos ambientais adversos reduziram drasticamente a produtividade média brasileira para 799 kg ha⁻¹ (CONAB, 2022). Na safra de 2017, precipitações pluviométricas intensas e baixa incidência de radiação solar no início do ciclo, associados à ocorrência de estiagem no período vegetativo, que possivelmente dificultou a realização da adubação nitrogenada no momento mais adequado do ciclo e geadas na fase reprodutiva foram as principais causas da redução drástica da produtividade (CONAB, 2017).

Para que se tenha êxito na produção agrícola, ou para que os prejuízos sejam mínimos, é necessário entender as respostas das plantas às distintas condições ambientais, devendo estas serem quantificadas e monitoradas adequadamente. Para a soja cultivada em ambiente subtropical Zanon et al. (2016), através de análise exploratória, definiram limites de produtividade potencial com a alteração da data de semeadura, informação de extrema importância para o manejo visando potencializar a produtividade. Dreccer et al. (2018), também realizaram associações entre as variáveis meteorológicas e altas e baixas

produtividades da canola na Austrália, concluindo que a canola é sensível à estresses hídricos principalmente na floração, porém pouco afeta se ocorrer no período anterior a floração. Esta informação pode ser utilizada para a definição de períodos críticos associados a data de semeadura em relação a menores probabilidades agroclimáticas de ocorrência.

Por ser uma cultura de grande potencial para o cultivo de outono/inverno na região Sul do Brasil, mas ainda apresentando baixa produtividade média e grande variação entre os anos, a produção da canola em diferentes ambientes deve ser estudada com mais profundidade e detalhamento. A relação das condições do ambiente com a produtividade das culturas agrícolas é essencial para a análise da variabilidade do desempenho de genótipos para o planejamento espacial e temporal da cultura, para assim propor estratégias de manejo para mitigar as perdas de produção e possibilitar a expansão das áreas, inclusão nos sistemas de produção e sua competitividade no agronegócio. Deste modo, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito das variáveis ambientais na produtividade máxima da canola em clima subtropical úmido do Rio Grande do Sul.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados foram obtidos no Rio Grande do Sul (RS), em experimentos conduzidos nas áreas experimentais da Universidade Federal de Santa Maria (lat.: 29°41'S; long.: 53°48'W; alt.: 103 m), Instituto Federal Farroupilha Campus São Vicente do Sul (lat.: 29°42'S; long.: 54°40'W; alt.: 134 m), Instituto Federal Farroupilha Campus Santo Ângelo (lat.: 28° 16' S; long.: 54° 13'W; alt.: 292 m) e EMBRAPA Trigo, em Passo Fundo (lat.: 28°22'S; long.: 52°40'W; alt. 681 m). Segundo a classificação de Köppen, esses locais estão inseridos em região de clima do tipo fundamental subtropical úmido (Cfa) (KUNCHTNER; BURIOL, 2001). Os solos das áreas experimentais de Santa Maria e São Vicente do Sul são descritos como Argissolo Vermelho Distrófico arênico, Santo Ângelo como Latossolo Vermelho Distroférico típico e de Passo Fundo como Latossolo Vermelho Distrófico húmico (EMBRAPA, 1999).

As semeaduras foram realizadas em uma ampla faixa de datas, no período de 14 de março a 06 de agosto (Tabela 1). Ao longo dos experimentos foram utilizados os genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Hyola 433, Alht B4, Hyola 61 e Alht M6. Conforme a média obtida de todos os experimentos, o genótipo Nuola 300 possuiu ciclo com duração média de 132 dias, Diamond 130 dias, Hyola 433 e Alht B4 com duração

média de 140 dias e Hyola 61 e Alht M6 duração média de 156 e 181 dias, respectivamente.

Tabela 1 - Ano de cultivo, local, data de semeadura e genótipos de canola semeados em Passo Fundo (PF), Santa Maria (SM), São Vicente do Sul (SVS) e Santo Ângelo (SA).

Ano	Local	Datas de semeadura	Genótipos
2010	PF	29/04, 13/05, 03/06 e 08/07	Hyola 61
2011	PF	15/05, 10/06, 05/07 e 26/07	Hyola 61
2014	PF	23/04/, 29/05 e 16/07	Hyola 61
2016	PF	07/04/, 15/04, 02/05, 18/05, 03/06 e 15/06	Alht M6, Diamond e Hyola 61
2016	SVS	30/06	Diamond, Hyola 61 l-- e Hyola 433
2017	PF	08/04 e 02/05	Alht M6, Diamond e Hyola 61
2017	PF	19/04	Alht B4, Alht M6, Diamond, Hyola 61 e Hyola 433
2017	PF	22/05	Diamond e Hyola 61
2017	PF	16/06	Diamond
2017	SVS	12/04	Diamond e Hyola 433
2017	SVS	03/05, 12/06 e 31/07	Diamond, Hyola 61 e Hyola 433
2018	PF	19/04, 10/05, 30/05 e 20/06	Diamond e Hyola 433
2018	PF	11/07	Diamond e Hyola 433
2018	PF	01/08	Alht B4, Diamond e Hyola 433
2018	SVS	06/08	Alht B4, Diamond, Hyola 61 e Hyola 433
2019	SM	14/03, 11/04, 20/05 e 11/06	Alht B4, Diamond e Hyola 433
2019	SM	08/07	Alht B4, Diamond, Hyola 433 e Nuola 300
2019	SVS	22/03	Alht B4, Hyola 433 e Nuola 300
2019	SVS	16/05	Alht B4, Hyola 433 e Nuola 300
2019	SVS	10/04	Alht B4
2019	SVS	08/06 e 09/07	Alht B4, Hyola 433 e Nuola 300
2019	SA	24/04 e 16/05	Alht B4, Diamond, Hyola 433 e Nuola 300
Total = 111 interações genótipo x ambiente			

Todos os experimentos foram conduzidos no delineamento experimental de blocos ao acaso com parcela subdividida com arranjo fatorial entre genótipos e datas de semeadura. O número de repetições variou ao longo dos experimentos, mas em todos eles o número mínimo foi três. O tamanho da unidade experimental também variou ao longo dos experimentos, variando de 6 m² à 18 m². As semeaduras foram realizadas em linhas em densidade de semeadura que permitisse obter 40 plantas por metro quadrado. Quando necessário foi realizado o desbaste das plantas em excesso após a emergência para obter a densidade desejada. Tratos culturais como adubação, controle de pragas, doenças e plantas daninhas foram realizados seguindo as recomendações para a cultura (TOMM, 2007), sempre que se identificou a necessidade.

Durante o ciclo das plantas foram realizadas determinações de desenvolvimento das plantas, seguindo a escala fenológica descrita por Iriarte e Valetti (2008). Foram observados os estádios de emergência, início do florescimento, final do florescimento e data da colheita. Foi calculada a soma térmica em escala diária (STd) e, de acordo com os dados fenológicos obtidos nas observações a campo, a soma térmica acumulada para cada subperíodo e para o ciclo total de desenvolvimento de todos os genótipos de canola utilizados. O cálculo da soma térmica diária (STd, °C.dia) foi realizado de acordo com o modelo de Wang e Engel (1998) que utiliza uma função de resposta não linear em relação a temperatura do ar. A função de temperatura $f(T)$ é uma função beta que varia de zero a um. A $f(T)$ é definida como (STRECK et al., 2003; WANG; ENGEL, 1998):

$$f(T) = [2(T_{\text{méd}} - T_b)^{\alpha} (T_{\text{ot}} - T_b)^{\alpha} - (T_{\text{méd}} - T_b)^{2\alpha}] / (T_{\text{ot}} - T_b)^{2\alpha} \quad (1)$$

$$\text{Se } T_b \leq T_{\text{méd}} \leq T_B \text{ então } f(T) = 0 \quad (2)$$

$$\text{Se } T_{\text{méd}} < T_b \text{ ou } T_{\text{méd}} > T_B \text{ então } \alpha = \ln 2 / \ln [(T_B - T_b) / (T_{\text{ot}} - T_b)] \quad (3)$$

$$\text{Nesse caso, } ST_a = f(T) \cdot (T_{\text{ot}} - T_b) \quad (4)$$

em que: $T_{\text{méd}}$ é a temperatura média diária $(T_{\text{max}} + T_{\text{min}}) / 2$ (em °C); T_b é a temperatura basal inferior, para a canola de 5 °C (NANDA et al., 1995); T_{ot} é a temperatura ótima, para a canola de 21°C (MORRISON, 1993); T_B é a temperatura base superior, para a canola de 27°C (MORRISON, 1993).

Para caracterizar as condições hídricas do solo em cada um dos experimentos, foram calculados os balanços hídricos sequenciais (BHS) diários durante o período de condução dos experimentos, conforme Thornthwaite e Mather (1955) e descrição de Pereira (2005). Utilizou-se a adaptação de Dourado Neto et al. (1999) para ponderar a variação diária da capacidade de armazenamento de água no solo (CAD_n) ao longo do ciclo, em função do crescimento e aprofundamento radicular das plantas de canola, descrita pela equação:

$$CAD_n = CAD_{\text{in}} + \left(\frac{CAD_f - CAD_{\text{in}}}{2} \right) \left\{ 1 - \cos \left[\left(\pi \left(\frac{1}{F} \right) \cdot \frac{ST_{(n)}}{ST} \right)^F \right] \right\} \quad (5)$$

em que: CAD_{in} , em mm, é a CAD inicial, que para Santa Maria foi considerada de 17,12 mm, para São Vicente do Sul considerou-se uma CAD_{in} de 17,28 mm, Santo Ângelo CAD_{in} de 12,05 mm e para Passo Fundo uma CAD_{in} de 18,55 mm, visto que para os três locais foi considerada a profundidade de 0,10 m; CAD_f , em mm, é a CAD final, que para Santa Maria foi considerada de 34,8 mm, para São Vicente do Sul de 33,6 mm, Santo Ângelo 45,75 mm e para Passo Fundo de 45,84 mm, visto que para Santa Maria e São

Vicente do Sul foi considerada a profundidade de 0,20 m e para Santo Ângelo e Passo Fundo a produtividade de 0,30 m; $ST_{(n)}$ é o valor de soma térmica acumulada até o dia “n”, em °C dia; ST é o valor de soma térmica necessária para atingir a CAD_f (°C dia), considerada a soma térmica quando a planta atingiu o estágio de início do florescimento, o que variou para cada genótipo para cada uma data de semeadura; F é o quociente exponencial, que para a canola foi 0,80, o mesmo utilizado por Tartaglia (2016).

Houve outro ajuste para a utilização do BHS de Pereira (2005) na escala diária, considerando que na medida que as raízes se aprofundam, ocupam mais volume e podem entrar em contato com solo mais úmido, umidade que precisa ser contabilizada no modelo. Deste modo, o Armazenamento (Armaz, em mm) passa a ter uma nova computação:

$$Armaz = (CAD e^{(Neg.Ac.n/CAD)}) + \{(PROF_n - PROF_{n-1}) (LS - LI) DS\} \quad (6)$$

em que: Neg.Ac.n é o negativo acumulado do balanço hídrico sequencial da cultura no dia “n”, calculado a partir da diferença entre a precipitação pluvial e a evapotranspiração da cultura (ETc); $PROF_n$ = profundidade do sistema radicular no dia “n” em mm, correspondendo proporcionalmente ao valor máximo final a 0,2 m para Santa Maria e São Vicente do Sul e 0,3 m para Passo Fundo e Santo Ângelo; $PROF_{n-1}$ = profundidade do sistema radicular no dia “n-1” em mm, correspondendo a 0,1 m; LS = é o limite superior (CC) de umidade gravimétrica do horizonte do solo em $g\ g^{-1}$; LI = é o limite inferior (PMP) de umidade gravimétrica do horizonte do solo em $g\ g^{-1}$; DS = densidade do solo em $g\ cm^{-3}$.

A capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e densidade do solo foram determinadas através de análise física do solo (Apêndice 1). A profundidade radicular foi calculada adaptando-se a equação de Dourado Neto et al (1999), utilizada para a CAD, à profundidade:

$$PROF_n = PROF_{in} + \left(\frac{PROF_f - PROF_{in}}{2} \right) \left\{ 1 - \cos \left[\left(\pi \left(\frac{1}{F} \right) \cdot \frac{ST_{(n)}}{ST} \right)^F \right] \right\} \quad (7)$$

em que: $PROF_{in}$ = é a profundidade inicial considerada de 0,10 m; $PROF_f$ = é a profundidade final efetiva para a canola, considerada de 0,20 m para Santa Maria e São Vicente do Sul e 0,3 m para Santo Ângelo e Passo Fundo.

Os dados meteorológicos diários de precipitação pluviométrica, temperatura mínima e máxima do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar incidente foram obtidos das Estações Meteorológicas Automáticas pertencentes ao 8º

Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), situadas nas respectivas cidades dos experimentos. A variável velocidade do vento foi obtida a 10 m de altura e posteriormente convertida para 2 m. Os dados meteorológicos em escala diária foram utilizados para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o , mm d^{-1}), que foi estimada pelo método de Penman-Monteith, calculada conforme Allen et al. (1998). Também utilizando a metodologia descrita por Allen et al. (1988) foi calculada a evapotranspiração máxima da cultura (ET_c), utilizando o quociente de cultura (K_c), adaptado de Allen et al. (1998), com valores de 0,35, 0,55 e 0,75 para o primeiro, o segundo e o terceiro terço do período vegetativo, de 1,15 para floração e de 0,35 para maturação.

O solo foi considerado sob déficit hídrico quando a evapotranspiração real da cultura (ET_r) foi menor que a evapotranspiração máxima da cultura (ET_c), sendo o valor do déficit hídrico (DH, em mm) obtido pela subtração do valor da ET_r do valor da ET_c . Para considerar o solo sob condição excesso hídrico, o armazenamento de água no solo deveria ser igual ao valor da CAD. Nesse caso o período em excesso hídrico foi contabilizado em número de dias.

Com os dados da quantidade efetiva de água utilizada pela planta em condições reais de cultivo (Evapotranspiração real - ET_r), relacionada com quantidade de água consumida sem restrição hídrica (Evapotranspiração máxima - ET_m) foi possível calcular o consumo relativo de água em escala diária, definido como o Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), descrito por:

$$ISNA = ET_r / ET_m \quad (8)$$

A produtividade dos grãos foi determinada pela colheita e debulha das plantas de 2 a 6,75 m^2 , sendo realizada manualmente quando as plantas se encontravam no estágio de maturação fisiológica, quando os grãos, na haste principal, mudaram da cor verde para a cor marrom. A umidade dos grãos foi determinada e a massa corrigida para o valor de 10%.

Funções limites entre os fatores ambientais durante o florescimento e a produtividade máxima da canola foram ajustadas, adaptando metodologia utilizada por Zanon et al. (2016) para descrever a resposta produtiva da soja em relação a diferentes datas de semeadura. Para o subperíodo de início do florescimento ao final do florescimento foram feitas contabilizações das seguintes variáveis meteorológicas: temperatura máxima absoluta do ar, temperatura máxima média do ar, temperatura mínima absoluta do ar, temperatura mínima média do ar e temperatura média diurna do

ar, temperatura média noturna do ar e temperatura média do ar ocorrida no subperíodo avaliado, em °C; média do fotoperíodo do subperíodo avaliado, em horas; média da velocidade do vento a 2 metros de altura no subperíodo avaliado, em m s⁻¹; média e soma da radiação solar incidente do subperíodo avaliado, em MJ m⁻²; média e soma térmica acumulada do subperíodo, em °C dia⁻¹; duração em dias do subperíodo; média e soma da precipitação pluviométrica no subperíodo avaliado, em mm; média da evapotranspiração máxima da cultura, em mm; média e acumulado de déficit hídrico do subperíodo, em mm; percentual e somatório dos dias com ocorrência de excesso hídrico; e ISNA (índice de satisfação por necessidade de água) para o subperíodo de início ao final do florescimento. Foram verificadas as relações entre a produtividade máxima da canola e as diferentes contabilizações das variáveis meteorológicas para o subperíodo de início ao final do florescimento através de regressões lineares e polinomiais de segundo grau. Para a determinação dos valores máximos de produtividade para comporem as regressões, as variáveis meteorológicas foram divididas de acordo com a metodologia de classes (K), sendo definida como:

$$K = \sqrt{n} \quad (9)$$

Sendo n o número de amostras, correspondendo as 11 interações genótipos ambiente.

Os intervalos para cada variável foram definidos de acordo com a amplitude amostral(h), definida como:

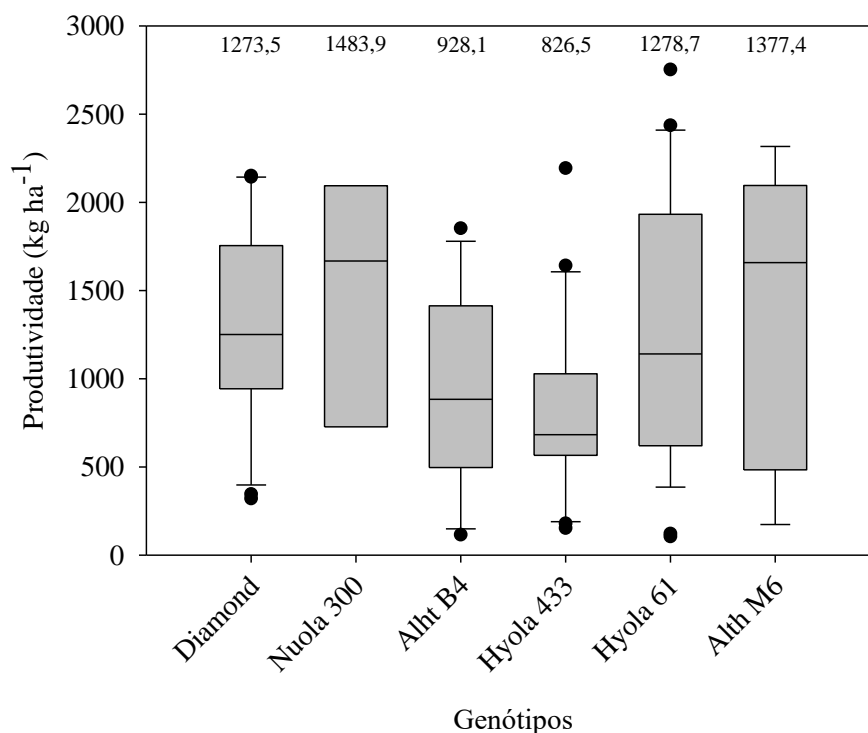
$$h = (\text{maior valor da amostra} - \text{menor valor da amostra})/K \quad (10)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produtividade de grãos de canola apresentou grande variação entre as datas de semeadura e genótipos estudados. A máxima produtividade obtida foi de 2752 kg ha⁻¹ para o genótipo Hyola 61, cultivado em Passo Fundo, enquanto a menor produtividade obtida foi de 105 kg ha⁻¹, também para o genótipo Hyola 61, no município de São Vicente do Sul. A produtividade média de grãos da canola variou entre os genótipos testado, sendo a maior média observada no genótipo Nuola 300, seguido pelos genótipos Alht M6 e Hyola 61, respectivamente (Figura 1). A escolha do material genético a ser utilizado em uma lavoura é de extrema importância e deve ser planejada adequadamente, buscando genótipos produtivos, mas que também coincidam seu ciclo de desenvolvimento com o

planejamento da safra das culturas sucessoras.

Figura 1 – Variabilidade, média (valores) e mediana da produtividade de grãos (kg ha^{-1}) para os genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019.



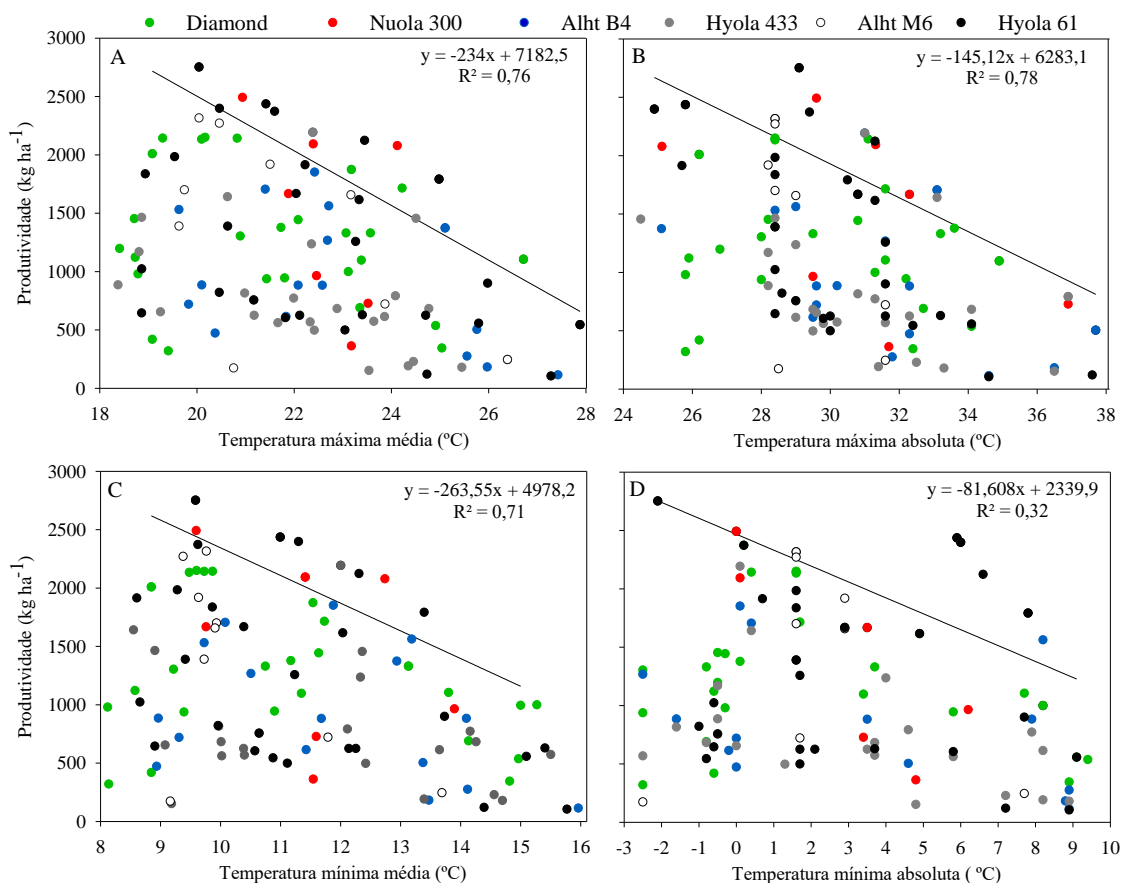
Produtividades superiores a 2000 kg ha^{-1} foram encontradas nos quatro locais de estudo e na grande maioria para os genótipos Diamond e Hyola 61. O genótipo Hyola 61 possui ciclo mais longo ao se comparar com o genótipo Diamond, com duração média de ciclo, verificada nos experimentos, de 156 dias e 130 dias respectivamente. Genótipos com maior ciclo de desenvolvimento, por terem maior período de crescimento mostraram-se mais produtivos em condições favoráveis. Porém, podem ser menos interessantes dentro do sistema de rotação, atrasando a semeadura da cultura sucessora em relação ao momento ideal. Desta forma, a escolha de genótipos com menor duração de ciclo como Diamond e Nuola 300 se mostram mais competitivos, pois além de apresentarem elevadas produtividades, se forem semeados no início do período indicado no zoneamento agrícola, sua colheita ocorrerá antes do período recomendado para a semeadura da soja, além de antecipar o enchimento de grãos em relação a setembro, mês com alta probabilidade de excessos hídricos (BURIOL et al., 1980). Além disso, ao se analisar o sistema produtivo, atrasos na data de semeadura da soja, principal cultura de verão, influenciados pelo longo ciclo da canola, são altamente prejudiciais ao potencial

produtivo da soja para regiões de clima subtropical (ZANON et al., 2016), e conseqüentemente podem diminuir os lucros do produtor, visto que a cultura da soja tem um maior retorno econômico do que a canola.

A antecipação da colheita da canola, através da utilização de genótipos de menor ciclo também é importante para que ocorra a decomposição da palhada da canola, minimizando o efeito alelopático da palhada de canola sobre a cultura da soja (TOMM, 2007). O uso de genótipos de canola de menor ciclo, além de demonstrarem alta produtividade, poderá auxiliar o agricultor a ter um bom retorno econômico nas safras de inverno, sem sacrificar produtividade da safra de verão, além de permitir a diversificação da gama de culturas cultivadas no ano e intensificação dos sistemas de produção.

A produtividade máxima da canola mostrou tendência de diminuir com o aumento da temperatura do ar do subperíodo de IF-FF (Figura 2). Esse comportamento é esperado, visto que a canola é uma cultura preferencialmente cultivada no inverno e adaptada a baixas temperaturas do ar. Com base na equação de regressão obtida é possível prever que a cada 1 °C de aumento da temperatura máxima absoluta do ar (Figura 2B) de 24 para 38°C no subperíodo de IF-FF há uma redução de 145 kg ha⁻¹ da produtividade máxima da canola, já em relação a temperatura máxima média essa redução é mais expressiva, com expectativa de perda da produtividade máxima de grãos de 234 kg ha⁻¹. Verifica-se também que a redução é muito mais acentuada para temperaturas máximas absolutas acima de 31 °C (Figura 2B) e para temperaturas máximas médias acima de 25 °C (Figura 2A). Produtividades acima de 2000 kg ha⁻¹ foram obtidas apenas para temperaturas máximas médias entre 19 e 24 °C e máximas absolutas entre 25 e 31 °C.

Figura 2 - Relação entre a temperatura máxima média do ar (A), temperatura máxima absoluta do ar (B), temperatura mínima média do ar (C) e temperatura mínima absoluta do ar (D) durante o subperíodo compreendido desde o início da floração até o final da floração (IF-FF) e a produtividade máxima de grãos de genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019.



Em plantas C_3 como a canola, temperaturas elevadas limitam a taxa de assimilação fotossintética de CO_2 e aumentam a taxa de fotorrespiração. Temperaturas elevadas acima de $29,5\text{ }^\circ\text{C}$, principalmente durante o estágio reprodutivo da canola, também podem causar danos irreversíveis, como a ocorrência de esterilidade e queda de flores, reduzindo drasticamente o potencial produtivo da canola (MORRISON e STEWART, 2002). Temperaturas do ar mais altas também podem encurtar o ciclo e o subperíodo reprodutivo da canola, reduzindo o período de interceptação de radiação solar, com consequente diminuição da síntese de fotoassimilados para a formação do número de grãos e enchimento de grãos.

A grande variação da produtividade também pode ser decorrente das condições

experimentais de campo, pois a temperatura máxima absoluta do ar pode ter durado um intervalo de tempo curto. Logo, nem todas as flores foram expostas a mesma intensidade de calor, sendo mais assertivo avaliar a produtividade em relação a temperatura máxima média. Cultivando canola em diferentes regiões da Austrália, Dreccer et al. (2018) também obtiveram grande variação da resposta produtiva da canola com aumento da temperatura máxima, o que resultou em uma fraca associação entre o baixo rendimento e maior temperatura máxima durante o enchimento de grãos, porém eles destacam que apesar dos efeitos da temperatura máxima não serem visíveis, como os danos ocasionados pela geada, são igualmente maléficos para a planta.

Observa-se grande discrepância de produtividade de grãos de canola para o mesmo valor de temperatura máxima absoluta do ar no subperíodo de IF-FF (Figura 2B), demonstrando que a redução da produtividade não é decorrente somente do aumento da temperatura do ar, pois a ocorrência simultânea de múltiplos estresses abióticos em vez de um estresse em particular é comumente observada em condições de campo. O efeito da temperatura máxima do ar na produtividade é acentuado pelo déficit hídrico no solo. Para a temperatura máxima absoluta do ar de 33 °C, houve variação de produtividade de 629 a 1706 kg ha⁻¹. Enquanto para maior a produtividade encontrada nesse nível de temperatura havia um acumulado de 21 mm de déficit hídrico, para a menor produtividade havia um déficit hídrico acumulado de 38 mm no subperíodo IF-FF. Estresse resultante da combinação temperatura máxima do ar elevada sob condição de déficit hídrico também foi relatado para a cultura do trigo (SHAH; PAULSEN, 2003), para o arroz de sequeiro (RANG et al., 2011) e para a canola cultivada no Irã (FARAJI et al., 2009). De acordo com Sadras e Dreccer (2015), as respostas da canola aos efeitos ambientais são variáveis ao longo do ciclo da planta, demonstrando ser mais responsiva a temperaturas estressantes e déficits hídricos no final da floração e início da formação dos grãos e, portanto, tem períodos sensíveis mais alinhados aos das leguminosas do que aos dos cereais.

Entender como a temperatura máxima no subperíodo de IF-FF afeta a produtividade da canola possibilita prever o comportamento produtivo em áreas de clima tropical, auxiliando na definição de aptidão de um genótipo em uma determinada região e/ou data de semeadura. Além disso, permite prever os riscos que a canola enfrentará em cenários de mudanças climáticas, que além do aumento das temperaturas médias, também levará a aumentos na frequência, duração e gravidade dos períodos com temperaturas extremas elevadas (IPCC, 2019).

Assim como para a temperatura máxima do ar, a produtividade máxima da canola

demonstrou tendência de diminuir com o aumento da temperatura mínima média do ar (Figura 2C). Observa-se que ocorre um aumento da produtividade máxima com o aumento da temperatura mínima média do ar até 10,5 °C, após isso há uma redução na produtividade máxima, sendo que as maiores produtividades (≥ 2000 kg ha⁻¹) foram encontradas em uma faixa de temperatura mínima média do ar, de 9,0 a 12,5 °C. Estima-se que acima de 10 °C, o aumento de 1°C no aumento da temperatura mínima média do ar cause redução na produtividade máxima de grãos de canola de 633 kg ha⁻¹.

A resposta da produtividade máxima da canola em relação a temperatura mínima absoluta do ar apresentou grande variação, com leve tendência de aumentar com a diminuição da temperatura mínima do ar de 4 para -2,5 °C, apresentando elevadas produtividades mesmo em condições de geada ($T_{Min} \leq 0$) (Figura 2D). Os danos causados pela geada na produtividade da canola dependerão principalmente do estágio fenológico em que houve a ocorrência e se houve ou não período de aclimação. A resposta da canola a temperatura do ar não é precisa, pois, 2752 kg ha⁻¹ de grãos de canola foram obtidos mesmo sob condição de temperatura mínima absoluta de -2,1°C, que ocorreu no início do florescimento. Com temperatura mínima absoluta do ar de -2,5 °C a produtividade da canola variou de 174 até 1304 kg ha⁻¹, sendo a menor produtividade obtida quando a geada ocorreu na plena floração e a maior quando geou no final da floração. Geadas no pleno florescimento, causam danos à emissão de novas flores, dano irreversível a óvulos, com redução da fertilidade das flores já existentes e a formação e/ou abortamento das siliquis e enchimento de grãos (KOVALESKI, 2019). Já no final do florescimento as geadas podem causar mais danos à formação e o abortamento das siliquis, prejudicando o enchimento de grãos e reduzindo o número de siliquis por planta, porém os impactos na produtividade são menores do que comparados a ocorrência de geadas no início e plena floração (THOMAS, 2003; DALMAGO et al., 2010; KOVALESKI, 2019).

Por apresentar crescimento indeterminado, geadas na floração da canola podem causar menor efeito sobre o rendimento dos grãos do que quando comparado a outras culturas invernais (TOMM, 2007), o que torna a canola uma cultura vantajosa para a safra de inverno do Sul do Brasil. Entretanto a recuperação do estresse causado pela geada dependerá, dentre outros fatores, se houve ou não aclimação da planta ao frio em período anterior a geada. A produtividade de 2752 kg ha⁻¹ de canola, obtida em condição de temperatura mínima do ar de -2,1 °C, foi resultante de ambiente que propiciou diminuição gradual da temperatura mínima do ar ao longo dos dias, o levou à aclimação das plantas

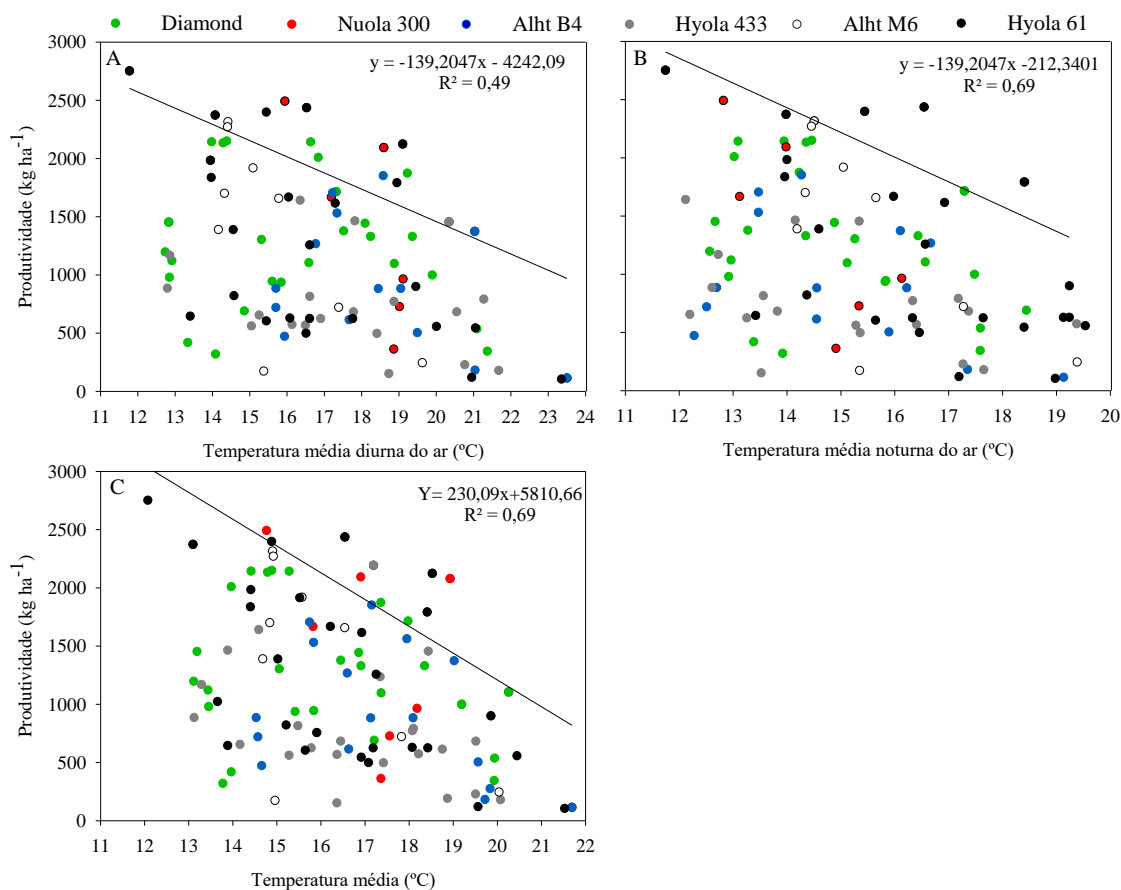
ao frio, sem causar danos excessivos a produtividade.

Além da intensidade da geada e do estágio fenológico da cultura no momento da ocorrência da geada, as condições anteriores, principalmente em relação as temperaturas de aclimação, vão influenciar a resposta da planta às baixas temperaturas do ar (DALMAGO et al., 2010). Plantas de canola aclimatadas ao frio apresentam boa adaptabilidade à ocorrência de geadas (KOVALESKI et al., 2019), porém sem aclimação, geadas no estágio reprodutivo da canola podem provocar abortamento de flores e siliquis e conseqüente redução do rendimento de grãos (MORRISON; STEWART, 2002; KOVALESKI, 2019; KOVALESKI et al., 2020). Buscar datas de semeadura com menor probabilidade de ocorrência de geadas no subperíodo de IF-FF ou buscar datas de semeadura que permitam a aclimação da canola ao frio e/ou genótipos mais adaptados são as melhores alternativas para evitar danos por geada à produtividade de grãos.

Genótipos com menor duração total do ciclo, como Diamond e Nuola 300, apresentaram duração do subperíodo de IF-FF relativamente longo, semelhante aos demais genótipos, em torno de 43 dias, o que permite compensar as eventuais perdas de flores provocadas por fatores adversos como geada. Com relação a ocorrência de geadas no subperíodo de IF-FF, os genótipos Nuola 300 e Diamond apresentaram as maiores produtividades em condição de geada, com produtividades médias de 2293 e 1048 kg ha⁻¹, respectivamente, enquanto os genótipos Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 apresentaram produtividade de 792, 796, 173 e 758 kg ha⁻¹, respectivamente, demonstrando assim ter maior adaptação ou aclimação mais efetiva ao frio (DALMAGO et al., 2010).

A produtividade máxima da canola mostrou tendência de diminuição com o aumento da temperatura média diurna, média noturna e média diária da temperatura do ar (Figura 3). Robertson et al. (2002) consideraram que a temperatura ótima para dar condições mais favoráveis para o crescimento e boa produtividade da canola é de 21 °C. Para as 111 interações genótipo x ambiente deste estudo, as maiores produtividades (acima de 2000 kg ha⁻¹) foram encontradas em uma faixa de temperatura média do ar no subperíodo de IF-FF de 12 a 18,9 °C (Figura 3C), faixa de temperatura menor que a indicada por Robertson et al. (2002) A expectativa é que com o aumento de 1°C na temperatura média do ar resulte em uma redução de 197,4 kg ha⁻¹ na produtividade de grãos.

Figura 3 - Relação entre a temperatura média diurna do ar (A), temperatura média noturna do ar (B), temperatura média do ar (C) durante o subperíodo compreendido desde o início da floração até o final da floração (IF-FF) e a produtividade máxima de grãos de genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019.



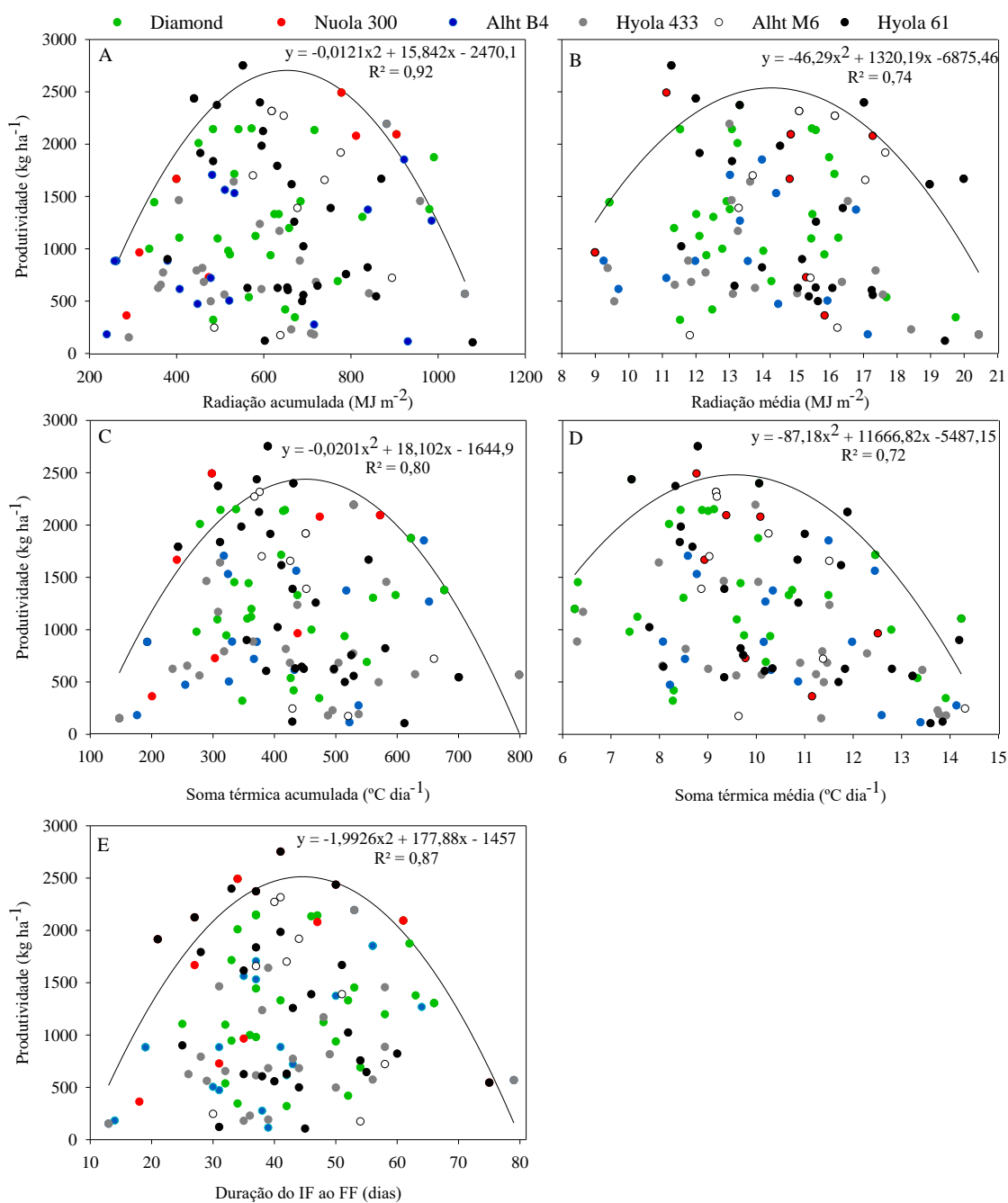
A canola é originalmente uma cultura de clima temperado a temperado frio. Deste modo, considerado a região de origem, a canola se beneficia de temperaturas amenas. Faraji et al. (2009) encontraram relação linear negativa do aumento da temperatura média do ar no subperíodo de floração com a produtividade de grãos, fato também observado no atual estudo. Deste modo, cabe no planejamento agrícola a escolha correta da data de semeadura que propicie média de temperatura do ar adequada para que a planta possa crescer e se desenvolver satisfatoriamente, resultando em altas produtividades de grãos.

A partir da emissão das estruturas reprodutivas, ainda no subperíodo de IF-FF, a planta de canola realoca parte da produção de fotoassimilados para as síliquis, as quais então passam produzir a maior parte da fotossíntese para a emissão de novas síliquis e, principalmente para o enchimento de grãos (SHEORAN et al., 1991). Esses autores

salientam que, desde a floração até a maturação fisiológica dos grãos, a contribuição das síliquas para a assimilação fotossintética líquida varia de 70 a 100%. A expectativa era de que maior radiação solar durante o florescimento estaria associada a maiores rendimentos, porém o aumento da produtividade máxima em relação à média (Figura 4A) e ao acumulado da radiação solar no subperíodo de IF-FF (Figura 4B) não é linear. Produtividades superiores à 2000 kg ha^{-1} , foram constatadas para um acumulado de radiação solar incidente de 450 a 904 MJ m^{-2} . Acima de 700 MJ m^{-2} de somatório de radiação solar incidente há uma tendência depreciativa, devido provavelmente ao aumento da temperatura do ar com a aproximação do solstício de verão, principalmente para as semeaduras tardias.

Possivelmente a produtividade máxima da canola com o aumento da radiação solar não é maximizada no subperíodo IF-FF em função da reflexão da radiação por parte das flores. A partir do início da floração as pétalas amarelas das flores interceptam e refletem radiação solar (BERRY; SPINK, 2006), diminuindo proporcionalmente a fotossíntese pelos tecidos verdes e assim, a planta não tem capacidade de produzir fotoassimilados suficientes para formar e manter todas as estruturas reprodutivas, podendo ocasionar menor produção de grãos por área. Técnicas de manejo como a escolha adequada do arranjo e densidade de plantas e da data de semeadura, o controle de plantas daninhas, além da busca pelo melhoramento genético dos genótipos visando senescência mais rápida da corola das flores, devem ser planejadas para buscar o aumento eficiência da interceptação da radiação solar.

Figura 4 - Relação entre a radiação solar acumulada (A), radiação solar média (B), soma térmica acumulada (C), soma térmica média diária (D) e duração em dia (E) do subperíodo compreendido entre o início do florescimento até o final do florescimento (IF-FF) e a produtividade máxima de grãos de genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019.



Espera-se que um período de prolongado de floração, com maior período para mobilização e acúmulo de reservas, seja mais vantajoso, pois caso aconteça algum evento adverso nesse período a planta consegue se recuperar parcialmente, emitindo novas

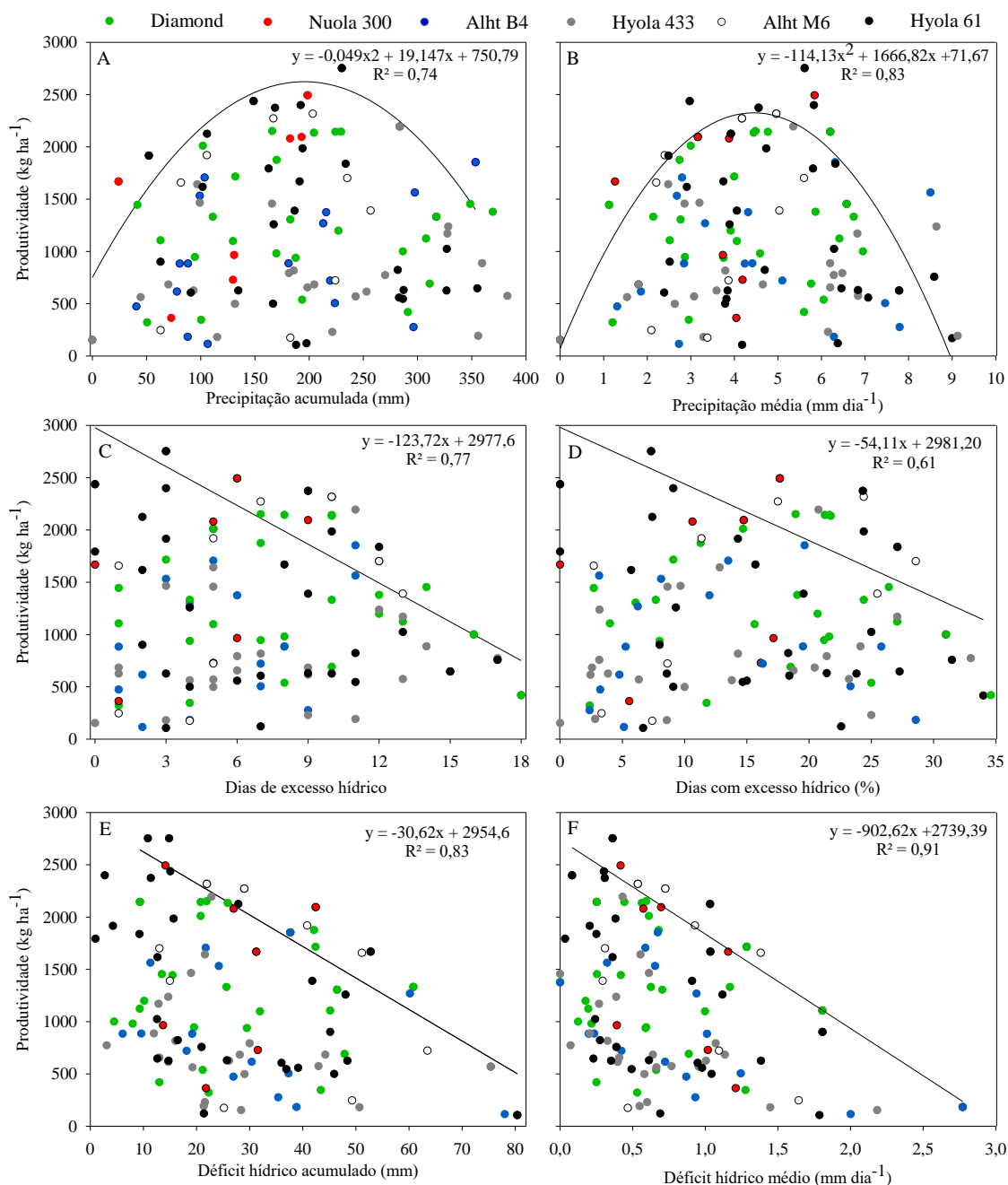
flores, compensando em parte aquelas que foram abortadas (TOMM, 2007), embora essa característica possa resultar em maior heterogeneidade de maturação das siliquas ao longo do ráculo. A variação do período entre o início ao final do florescimento da canola foi alta ao se contabilizar a duração em soma térmica acumulada (Figura 4C) ou o número de dias (Figura 4E). A variação também pode ser observada dentro dos diferentes genótipos considerados. Foi possível encontrar produtividades acima de 2000 kg ha⁻¹ em um intervalo de 278 a 572 °C dia de soma térmica acumulada, porém com tendência de diminuir com o aumento da duração do subperíodo acima de 500 °C dia acumulados. O maior acúmulo térmico diário no subperíodo (Figura 4D) também demonstrou comportamento polinomial, com aumento da produtividade máxima com o aumento do acúmulo térmico até 11 °C dia⁻¹, após ocorre diminuição.

Maior duração do subperíodo de IF-FF, embora favoreça a interceptação de maior quantidade de energia solar, pode ser relacionado com perdas na colheita devido à heterogeneidade de maturação, pois no momento da colheita algumas siliquas ainda podem estar verdes enquanto outras podem já apresentar deiscência natural. Além disso, podem gerar maiores custos para a secagem dos grãos. Krüger et al. (2014) também já haviam constatado que a maior duração no subperíodo de antese não é tão importante na cultura da canola, por constatar correlação negativa com a produtividade de grãos. Para a cultura da soja Navarro Júnior e Costa (2002) também não observaram maiores produtividades de grãos com o aumento do período de floração, associando isso as relações fonte-dreno da planta, pois ao mesmo tempo em que ocorre a produção e fixação de legumes, ocorre a formação de novas flores, o que gera uma competição entre as estruturas reprodutivas.

A canola é descrita como uma cultura com baixas necessidades hídricas para obter bons rendimentos de grãos, utilizando em torno de 455 mm de água em todo seu ciclo (DOGAN et al., 2011), com eficiência do uso da água de até 5,4 kg ha⁻¹ mm⁻¹ ao longo do ciclo (TESFAMARIAM et al., 2010), sendo a floração o período mais sensível à estresses hídricos (THOMAS, 2003). A resposta produtiva da canola em relação ao acumulado de precipitação pluviométrica no subperíodo de IF-FF foi bem variada (Figura 4A). Produtividades superiores a 2000 kg ha⁻¹ foram obtidas para acumulados de precipitação pluviométrica que variaram de somente 102 mm até 283 mm. Já a máxima produtividade (2752 kg ha⁻¹) foi obtida com cerca de 230 mm de precipitação pluviométrica, demonstrando assim grande adaptabilidade da canola as condições hídricas no subperíodo de floração e provável utilização da fração de água disponível no solo nos

períodos sem precipitação. Portanto, o total de precipitação pluviométrica acumulada no subperíodo não é o parâmetro hídrico mais adequado, pois a sua distribuição pode ser totalmente desuniforme e inadequada. Em caso extremo poderia haver seca durando a maior parte do mesmo e precipitação pluviométrica muito intensa com alto valor acumulado apenas nos dois últimos dias do subperíodo, ou mesmo um ótimo suprimento hídrico imediatamente anterior ao IF, o que supriria a falta de precipitação pluviométrica pelo menos nos primeiros 10 dias. A quantidade de água que entrou no sistema nesse subperíodo também está altamente correlacionada com a duração do subperíodo. De acordo com a análise dos dados, quando houve a entrada de somente 24 mm de precipitação pluviométrica no IF-FF a duração desse subperíodo foi de apenas 27 dias, com ISNA de 60%, e para o acumulado de precipitação pluviométrica de 386 mm a duração desse subperíodo foi de 45 dias, com ISNA de 89%. A resposta da canola às condições hídricas ainda é pouco estudada no Brasil, devendo serem exploradas com base no balanço hídrico diário, buscando genótipos com alta eficiência do uso de água e tolerantes à estresses hídricos.

Figura 5 – Relação entre a precipitação pluviométrica acumulada (A), precipitação pluviométrica média (B), dias com excesso hídrico (C), percentual de dias com excesso hídrico (D), déficit hídrico acumulado (E) e déficit hídrico médio (F) no subperíodo compreendido entre o início do florescimento até o final do florescimento (IF-FF) e a produtividade máxima de grãos de genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019



Avaliando a precipitação pluviométrica média (razão da precipitação total ocorrida pela duração do subperíodo) as maiores produtividades encontradas estavam em um intervalo de 3 a 6 mm dia⁻¹ (Figura 5B). Esses valores são inferiores ao encontrado

por Thomas (2003), no Canadá, em que a necessidade hídrica da canola variou entre 6 e 8 mm dia⁻¹, durante o final da alongação do colmo principal, floração e formação inicial das síliquas. A maior demanda hídrica da canola cultivada no Canadá, em relação à cultivada no Rio Grande do Sul, está relacionada diretamente com a condição de elevada demanda hídrica, resultante de maior temperatura do ar e fotoperíodo do local.

Períodos com excesso hídrico são comuns em todo estado do Rio Grande do Sul, principalmente nos meses de maio a setembro (BURIOL et al, 1980). O impacto do excesso hídrico nas plantas se dá principalmente pelo suprimento inadequado de oxigênio às raízes, sendo o impacto direto na morte de raízes e indireto na fisiologia de toda planta, e dependendo da magnitude, pode trazer grandes limitações a espécies não adaptadas. A resposta produtiva da canola aos dias de excesso hídrico obtidos por BHS diário apresentou comportamento bastante amplo. A função quadrática ajustada permite inferir um menor impacto do excesso hídrico na produtividade da canola, visto que as produtividades acima de 2000 kg ha⁻¹ foram obtidas com até 11 dias com excesso hídrico no solo no subperíodo de IF-FF, o que demonstra boa tolerância da canola à essa condição (Figura 5C). Ao se analisar o percentual de dias com excesso hídrico em relação à duração total do subperíodo de IF-FF, altas produtividades foram obtidas com até 25% do período sob condição de excesso hídrico (Figura 5D). Provavelmente, o menor impacto do excesso hídrico na produtividade da canola esteja mitigado, em parte, pelo fato do estresse não ter ocorrido de maneira contínua ao longo dos dias, dando condições de recuperação à planta. Outro fator relacionado é a condição de relevo ondulado nos quatro locais dos experimentos, o que pode ter atenuado o acúmulo de água na superfície.

Para a canola o início do florescimento é considerado um dos estádios mais críticos para estresses por excesso hídrico (TARTAGLIA et al., 2018). Tartaglia et al. (2018), ao submeterem a canola a oito dias de excesso hídrico contínuo em vasos, obtiveram redução de 30,7% de produtividade em comparação ao tratamento controle, sem excesso hídrico. Porém sob condições de cultivo à campo, onde há interação de diversas outras variáveis meteorológicas a resposta produtiva da canola ao excesso hídrico pode ser diferente. Xu et al. (2015), sob condição de 7 dias consecutivos de excesso hídrico no início do florescimento em campo, também obtiveram redução média de 20% da produtividade. Tartaglia (2016) conclui que, mesmo em condição de excesso hídrico, a canola consegue atingir produtividades médias de 1.500 kg ha⁻¹, próximas à média nacional, denotando assim que a canola pode ser inserida em áreas de terras baixas ou várzeas no estado do Rio Grande do Sul, com resultados promissores, principalmente

se for utilizada a técnica de drenagem superficial do solo (TANTAGLIA et al., 2018; SCHAEFER, 2021). Indiretamente, pode-se inferir que um baixo número de dias com excesso hídrico também está relacionado a menor precipitação pluviométrica, que por sua vez pode evoluir para condições de déficit hídrico.

A produtividade máxima da canola apresentou tendência de diminuir linearmente com o somatório do déficit hídrico (Figura 5E) e o déficit hídrico médio (razão do déficit hídrico total ocorrido pela duração do subperíodo) (Figura 5F), ocorrido no subperíodo de IF-FF. A relação do déficit hídrico médio e a produtividade máxima da canola apresentou elevado coeficiente de determinação ($R^2=0,91$), demonstrando a importância do déficit hídrico como fator redutor da produtividade. Durante o florescimento a previsão é de que a cada 1 milímetro de déficit hídrico acumulado há uma perda de produtividade máxima de aproximadamente $30,6 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figura 5E).

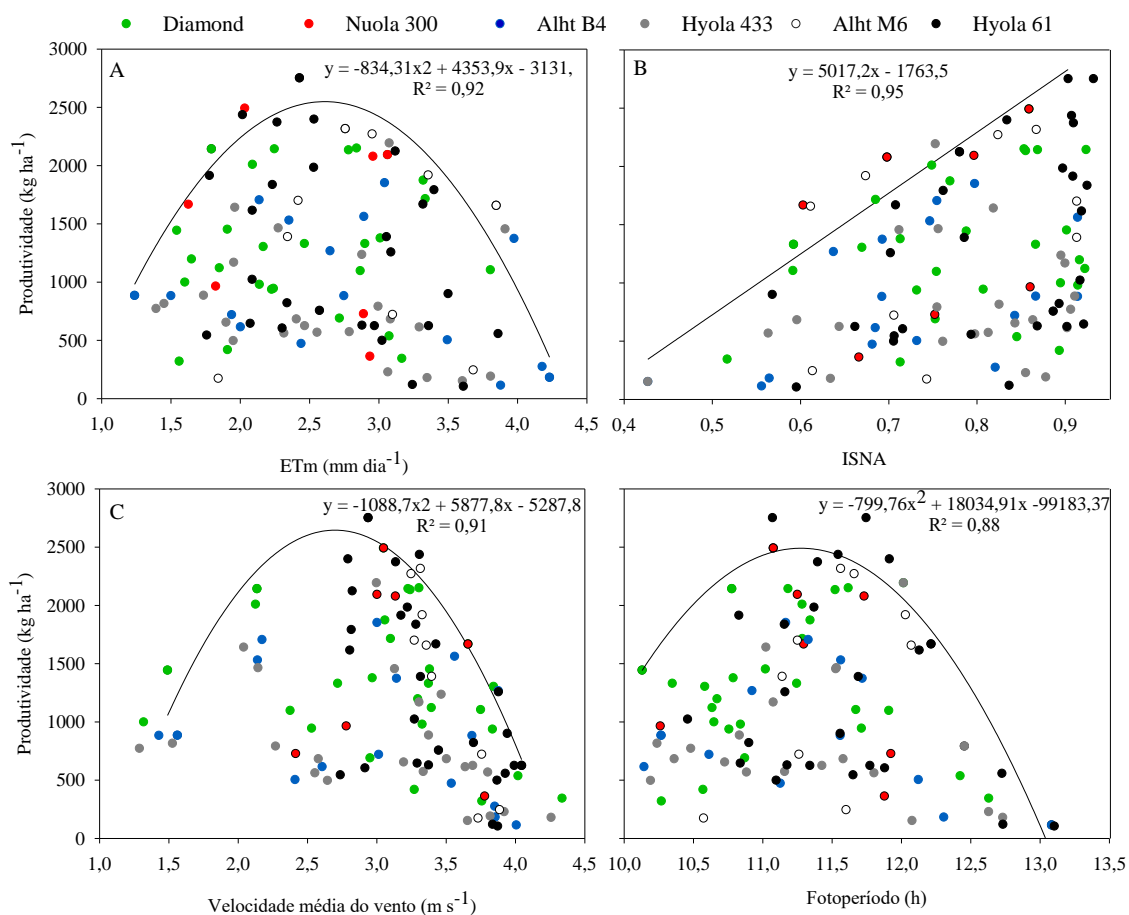
Apesar da canola ser uma cultura típica do inverno, a ocorrência de déficit hídrico, mesmo menos frequentes e de menor intensidade (CARDOSO, 2005; BURIOL et al., 1980), ainda ocorrem com alguma aleatoriedade. Quando ocorre na floração, o déficit hídrico pode resultar em um declínio do índice de área foliar e biomassa acima do solo, abortamento e abscisão de flores e siliquas (TESFAMARIAM et al., 2010), além da redução dos componentes do rendimento e do teor de óleo (THOMAS, 2003). Segundo Faraji et al. (2008), em condições de déficit hídrico, há reduções no número de siliquas por planta, na massa de mil grãos e na produtividade em até 45%. Apesar de haver uma tendência de diminuição da produtividade com o aumento do déficit hídrico, todas as 16 produtividades mais altas, acima de 2000 kg ha^{-1} , foram encontradas para uma faixa de déficit hídrico de 2,7 até 42 mm no subperíodo IF-FF. Essa resposta de baixo impacto até esse nível de déficit hídrico pode ser explicada pelo provável aprofundamento radicular, resposta das plantas a situações de déficit hídrico que se acentua lentamente nos meses de baixa demanda e assim permite que o crescimento das raízes da planta passe a explorar camadas do solo inferiores com maior armazenamento de água disponível, atenuando o estresse. Hergert et al. (2016) concluíram que em solos arenosos a canola foi capaz de extrair a água em profundidades superiores a 1,2 m quando em situações de déficit hídrico. Maior aprofundamento radicular em situação de déficit hídrico também foi verificada para a cultura do girassol, até a profundidade de 98 cm, em Argissolo similar em Santa Maria, RS (LOOSE, 2016). Tanto o déficit quanto o excesso hídrico causaram redução na produtividade, mas o déficit hídrico causou perdas em uma amplitude maior. Resultados semelhantes foram encontrados por Loose et al. (2019) para a cultura do

girassol.

Para Dreccer et al. (2018), o rendimento da canola não foi relacionado negativamente ao estresse hídrico até 300 °C dia antes da floração, porém sua influência foi significativa de forma constante durante a floração e enchimento de grãos. Os mesmos autores correlacionaram os baixos rendimentos da canola a menor relação oferta/demanda de água em comparação com outras culturas. Uma alternativa para minimizar a perda de produtividade por déficit hídrico é o uso de irrigação suplementar. Sanches et al. (2014) alcançaram produtividade de 3145 kg ha⁻¹ com o uso de irrigação suplementar em Dourados – MS, valor superior aos encontrados nesse trabalho e em uma região sem tradição de cultivo da canola, porém com a vantagem de ser cultivada sob condições de elevada disponibilidade de radiação solar em todo o subperíodo reprodutivo.

A resposta da produtividade máxima da canola está fortemente relacionada com a média da evapotranspiração máxima da cultura (Figura 6A). Observa-se tendência de aumento da produtividade até 2,4 mm dia⁻¹ de ET_m. Acima desse valor a tendência da produtividade é de reduzir. A evapotranspiração é um processo indispensável para a planta, pois permite que durante a saída de vapor de água da folha para atmosfera ocorra a absorção de luz e gás carbônico. Porém, sob elevada demanda evapotranspiratória, sobretudo em altas temperaturas do ar, a planta não consegue absorver do solo, água em velocidade adequada para suprir as perdas, podendo ocasionar, mesmo em solos com água facilmente disponível, situações de déficit hídrico parcial nos horários de maior demanda hídrica.

Figura 6 – Relação entre a evapotranspiração máxima da cultura (ETm) (A), índice de satisfação por necessidade de água (B), velocidade média do vento (C) e fotoperíodo (D) no subperíodo compreendido entre o início do florescimento até o final do florescimento (IF-FF) e a produtividade máxima de grãos de genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019.



O ISNA é uma ferramenta muito útil em estudos agrometeorológicos, principalmente na elaboração do zoneamento agrícola de risco agroclimático (ZARC), através da seleção de subperíodos mais sensíveis ao déficit hídrico, e posterior definição de áreas de risco em sistemas de produção (MATZENAUER; BARNI; MALUF, 2004). O ISNA é um índice agrometeorológico de extrema importância e pode ser utilizado no planejamento agrícola, principalmente no escalonamento das datas de semeadura dos cultivos agrícolas. Em relação a produtividade máxima da canola, a resposta ao ISNA se mostrou linear, com aumento da produtividade à medida que a necessidade de água foi suprida para a planta. Produtividades de canola acima de 2000 kg ha^{-1} foram obtidas

somente quando mais de 70% da sua necessidade média por água foi suprida (Figura 6B). Considerando a regressão linear obtida, verifica-se que uma redução de 1% no ISNA tem potencial de reduzir em torno de 50 kg ha⁻¹ de grãos de canola.

No atual zoneamento agrícola de risco agroclimático para cultura de canola, em sistema de cultivo de sequeiro, no Estado do Rio Grande do Sul (MAPA, 2021) o ISNA é considerado para delimitar datas e municípios aptos para a semeadura. O ZARC considerou o ISNA em dois subperíodos distintos, da emergência até o estabelecimento da cultura e do florescimento e enchimento dos grãos, devendo o ISNA ser $\geq 0,6$ no primeiro subperíodo e $\geq 0,45$ no segundo subperíodo avaliado, considerando aptos os municípios que apresentaram, em no mínimo 20% de sua área, esses critérios. O subperíodo avaliado pelo ZARC é diferente do considerado nesse estudo, apesar de muitas vezes o enchimento de grãos ocorrer de forma concomitante ao florescimento, é possível observar que limites de ISNA de até 0,45 podem resultar em redução expressiva da produtividade e um limite superior poderia ser considerado visando obter produtividades de canola mais elevadas, que poderiam resultar em maior lucratividade ao produtor rural. A desvantagem de aumentar o limite mínimo seria restringir mais as possíveis datas de semeadura, porém reduziria os riscos por déficit hídrico.

A velocidade do vento é uma das variáveis meteorológicas responsáveis pela evapotranspiração, pois a velocidade de renovação da camada de ar úmido junto as folhas aumenta até cerca de 5 m s⁻¹. Quando o ar que circunda a folha se desloca muito lentamente, a camada de ar quase estacionário junto à superfície foliar pode ser tão espessa que se torna a principal resistência à perda de vapor de água pela folha. Quando a velocidade do vento é alta, o ar em movimento reduz a espessura da camada limite sobre a superfície da folha, diminuindo a resistência dessa camada aumentando a perda de água da folha (TAIZ et al., 2017). Nos experimentos realizados a campo a faixa das melhores produtividades de canola, acima de 2000 kg ha⁻¹, foram encontradas para uma faixa de velocidade do vento de 2,2 a 3,3 m s⁻¹ (Figura 3A). Porém produtividades acima de 1500 kg ha⁻¹ foram encontrados para uma faixa mais ampla, de 2 a 3,6 m s⁻¹. Mesmo assim, não seria lógico inferir que a redução da produtividade máxima da canola para velocidades do vento superiores à 3,6 m s⁻¹ possa ser decorrente de uma eventual incapacidade da planta em conseguir suprir melhor o pequeno aumento da demanda evaporativa causado pelo aumento da velocidade do vento de 3,6 para 4,5 m s⁻¹. A canola é considerada uma cultura autopolinizada, porém a presença de insetos polinizadores aumenta a produtividade de grãos. Mussury e Fernandes (2000) demonstraram um

aumento de aproximadamente 32 % do número de sementes por planta em condições de polinização natural, quando comparado às condições de autogamia. A diminuição da produtividade com o aumento da velocidade do vento pode estar relacionada indiretamente com a atividade de insetos polinizadores nas lavouras. Kleinert-Giovannini e Imperatriz-Fonseca (1986) observaram decréscimo da atividade das abelhas sem ferrão *Melipona marginata marginata* e *M. m. obscurior*, comuns no Rio Grande do Sul (BORGES; BLOCHTEIN, 2005), para velocidades do vento superiores a $3,0 \text{ m s}^{-1}$. Outro fator que pode estar relacionado com as menores produtividades observadas em velocidades do vento acima de $3,6 \text{ m s}^{-1}$ é a queda das estruturas reprodutivas, principalmente as flores, e possível acamamento das plantas. A relação da velocidade do vento com a produtividade das culturas agrícolas é pouco estudada, e é possível que a resposta obtida nesse estudo possa ser efeito da aleatoriedade ou outros fatores associados ao vento, como a baixa pressão atmosférica que antecede períodos de precipitações pluviométricas intensas.

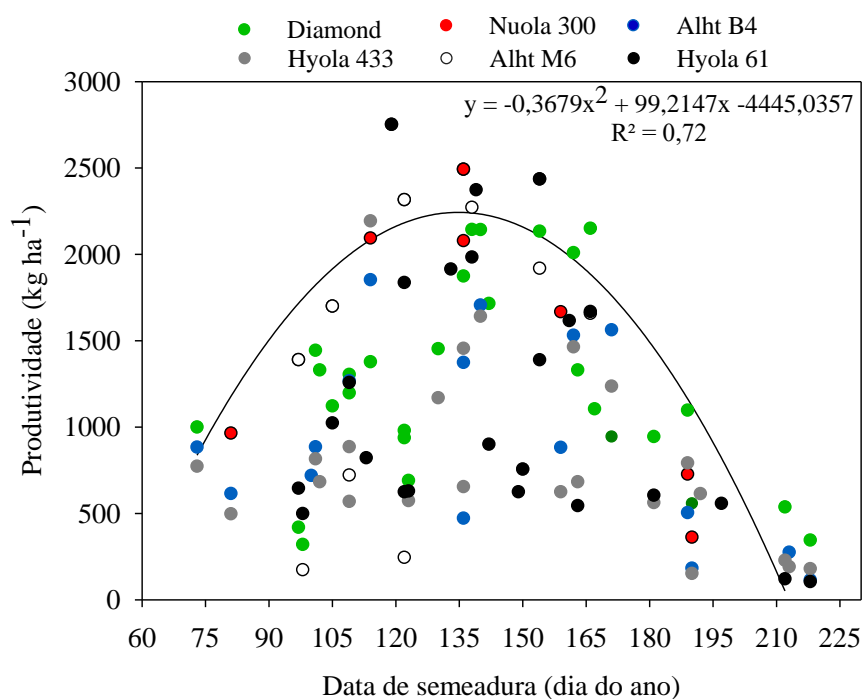
Segundo Robertson et al. (2002), a canola é uma planta de dia longo, com indução à antese para uma ampla faixa de fotoperíodo, entre 10,8 e 16,3 horas. Para as diferentes datas de semeadura abrangidas nesse estudo a faixa de fotoperíodo durante o IF ao FF correspondeu de 10,12 a 13,2 horas (Figura 6D). Semeaduras de canola realizadas no mês de março podem não suprir o fotoperíodo mínimo necessário a indução do florescimento, levando ao alongamento do ciclo. Apesar dos híbridos de canola disponíveis no Brasil serem descritos como menor sensibilidade ao fotoperíodo (DALMAGO et al., 2009) a produtividade máxima da canola demonstrou tendência de aumento com o aumento do fotoperíodo até 11,5 horas, após há um comportamento de redução, devido principalmente ao conseqüente aumento da temperatura do ar e demanda hídrica.

A produtividade de uma cultura é definida pela interação entre a planta, o ambiente e o manejo. A interação entre os fatores ambientais e a planta deve servir de base para definir a data de semeadura. Esta interação, por sua vez, altera as respostas agrônômicas das culturas agrícolas, sendo a data de semeadura a variável que, sem investimentos, produz maior impacto sobre o rendimento das culturas (PEIXOTO et al., 2000). Evitar ou minimizar os riscos de que estresses térmicos e hídricos possam causar danos às plantas ou coincidam com os subperíodos mais críticos do ciclo da cultura, através da semeadura em datas mais adequadas, pode representar um fator determinante para que se tenha sucesso na produção e estabelecer uma relação comercial competitiva e duradoura. Portanto, a correta determinação da data de semeadura é fundamental para se aproximar

da produtividade potencial de cada genótipo em cada região.

Para as áreas de clima subtropical do estudo, produtividades elevadas ($> 2000 \text{ kg ha}^{-1}$) foram encontradas em uma ampla faixa de semeadura, que se estende desde 24/04 a 15/06, correspondendo aos dias 114 e 166 do ano (Figura 7). Também se verifica que nesse período 60 % das datas de semeadura obtiveram produtividade superior a média nacional de 2021 (CONAB, 2022). Praticamente todo o período de semeadura em que foram encontradas elevadas produtividades nesse estudo estão dentro do indicado no do zoneamento agroclimático para a canola no Rio Grande do Sul, de 21/03 a 10/06 (BRASIL, 2021). Essa faixa de semeadura também está de acordo com os resultados obtidos por Luz (2011), que para Santa Maria-RS, a maior produtividade de grãos da cultura da canola foi verificada no período delimitado entre 3 de abril e 12 de junho. Já para o noroeste do Rio Grande do Sul, a produtividade tende a diminuir com prolongamento da semeadura após abril (TOMM et al., 2004). As altas produtividades encontradas para semeaduras realizadas entre 24/04 e 15/06 estão diretamente relacionadas à maior disponibilidade de radiação solar e pela temperatura mais amena no subperíodo de IF-FF, além do menor risco de estresse por déficit hídrico.

Figura 7 - Relação entre data de semeadura e a produtividade máxima de grãos de genótipos de canola Nuola 300, Diamond, Alht B4, Hyola 433, Alht M6 e Hyola 61 em quatro locais do Rio Grande do Sul, em diferentes datas de semeadura nos anos de 2010 a 2019



CONCLUSÃO

A produtividade máxima da canola é influenciada pela radiação solar, condições térmicas e hídricas no subperíodo de início de florescimento ao final do florescimento.

A cada 1% de redução no índice de satisfação das necessidades hídricas no subperíodo de início de florescimento ao final do florescimento, ocorre perda de aproximadamente 50 kg ha⁻¹ de produtividade máxima.

Produtividades de canola maiores que 2000 kg ha⁻¹ foram obtidas em semeaduras realizadas de 24 de abril a 15 de junho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 56).

BERRY, P. M.; SPINK, J. H. A physiological analysis of oilseed rape yields: Past and future. **Journal of Agricultural Science**, v.144, p.381-392, 2006.

BORGES, F.B; BLOCHTEIN, B. Atividades externas de *Melipona marginata obscurior* Moure (Hymenoptera, Apidae), em distintas épocas do ano, em São Francisco de Paula, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 22, n. 3, p. 680-686, 2005.

BRASIL. Portaria Nº. 497 de 09 de novembro de 2021. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de canola, em sistema de cultivo de sequeiro, no Estado do Rio Grande do Sul**. Brasília (DF): Diário Oficial da União, 11 Nov. 2021, Seção 1.

BURIOL, G. A. et al. Disponibilidades hídricas do solo possíveis de ocorrerem no estado do Rio Grande do Sul. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 10 (suplemento), p. 1-141, 1980.

CARDOSO, C.D.V. **Probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica nos solos da Região Central do Estado do Rio Grande do Sul**. 2005. 186p. Tese (Doutorado em Agronomia) –Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2005.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 9, safra 2021/22, n. 6 sexto levantamento,

março 2022. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos> > Acesso em: 15 Abr. 2022.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 5 - Safra 2021/22, n. 6 - Quarto levantamento, janeiro 2018 Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos> > Acesso em: 15 Abr. 2022.

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.

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

DOURADO-NETO, D. et al. Balance hídrico cíclico y secuencial: estimación de almacenamiento de água em El suelo. **Scientia Agrícola**, v.56, n.3, p.537-546,1999.

DRECCER, M. F. et al. Comparison of sensitive stages of wheat, barley, canola, chickpea and field pea to temperature and water stress across Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 248, p. 275-294, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

FARAJI, A. et al. Effect of high temperature stress and supplemental irrigation on flower and pod formation in two canola (*Brassica napus* L.) cultivars at mediterranean climate. **Asian Journal of Plant Science**, v. 7, n. 4, p. 343-351, 2008.

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

HERGERT, G.W. et al. Yield, irrigation response, and water productivity of deficit to fully irrigated spring canola. **Agricultural Water Management**, v. 168, p. 96-103, 2016.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change and land, an IPCC special report on climate change, desertification, land**

degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. IPCC, Geneva, Switzerland, 98 p., 2019.

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

KLEINERT-GIOVANNINI, A.; IMPERATRIZ-FONSECA, V.L. Flight activity and responses to climatic conditions of two subspecies of *Melipona marginata* Lepeletier (Apidae, Meliponinae). **Journal of Apicultural Research**, v. 25, p. 3-8. 1986.

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, RS, 2019.

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

KOVALESKI, S. et al. Soil-surface straw influences micrometeorological conditions during frosts. **Journal of Agricultural Science**, v. 12, n. 11, p. 246-259, 2020.

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, 2014.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas**, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2001.

LOOSE, L. H. **Respostas agronômicas e morfológicas do girassol ao déficit e excesso hídrico em dois solos.** 2016 [f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2016.

LOOSE, L.H. et al. Yield and quality of sunflower oil in Ultisol and Oxisol under water regimes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 7, p. 532-537, 2019.

LUZ, G.L. 2011. **Exigência térmica e produtividade de Canola em diferentes épocas de semeadura em Santa Maria – RS.** 68 p. Dissertação. (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

- MATZENAUER, R. et al. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura do feijoeiro na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 34, p. 1363-1369, 2004.
- MORRISON, M.J. Heat stress during reproduction in summer rape. **Canadian Journal of Botany**, v.71, p.303-308, 1993.
- MORRISON, M.J.; STEWART, D.W. Heat stress during flowering in summer Brassica. **Crop Science**, v.42, p.797-803, 2002.
- MUSSURY, R.M.; FERNANDES, W. Studies of the floral biology and reproductive system of *Brassica napus* L. (Cruciferae). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 43, p. 111-117, 2000.
- NANDA, R. et al. Phenological development of *Brassica campestris*, *B. juncea*, *B. napus* and *B. carinata* grown in controlled environments and from 14 sowing dates in the field. **Field Crops Research**, n.46 p.93-103, 1996.
- NAVARRO JUNIOR, H.M.; COSTA, J.A. Contribuição relativa dos componentes do rendimento para produção de grãos em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 3, p. 269-274, 2002.
- PEIXOTO, C.P. et al. Épocas de semeadura e densidade de plantas de soja: I. Componentes da produção e rendimento de grãos. **Scientia agrícola**, v. 57, n. 1, p. 89-96, 2000.
- PEREIRA, A.R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, v. 64, n. 2, p. 311-313, 2005.
- RANG, Z.W. et al. Effect of high temperature and water stress on pollen germination and spikelet fertility in rice. **Environmental and Experimental Botany**, v. 70, n. 1, p. 58-65, 2011.
- SADRAS, V.O. et al. Unscrambling confounded effects of sowing date trials to screen for crop adaptation to high temperature. **Field Crops Research**, v. 177, p. 1-8, 2015.

SANCHES, A.C. et al. Produtividade da canola sob irrigação e doses de adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 688-693, 2014.

SCHAEFER, P. E. **Manejo de canola em terras baixas: características do dossel, interceptação da radiação e produtividade de grãos**. 2021. 165 p. Tese. (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2021.

SHAH, N.H.; PAULSEN, G.M. Interaction of drought and high temperature on photosynthesis and grain-filling of wheat. **Plant Soil**, v. 257, p. 219-226, 2013.

SHEORAN, I.S. et al. In vivo fixation of CO₂ by attached pods of *Brassica campestris* L. **Annals of Botany**, n. 67, p. 425-428, 1991.

STRECK, N. A. et al. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 115, n. 3/4, p. 139-150, 2003.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

TARTAGLIA, F.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.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, RS, 2016.

TESFAMARIAM, E.H. et al. Water stress effects on winter canola growth and yield. **Agronomy Journal**, v. 102, n. 2, p. 658-666, 2010

THOMAS, P. **Canola grower's manual**. Winnipeg: Canola Council of Canada. 2003. Disponível em: <http://www.canolacouncil.org/canola_growers_manual.aspx>. Acesso em 20 mai. 2022.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 1955. 104p.

TOMM, G.O. et al. **Efeitos de épocas de semeadura sobre o desempenho de genótipos de canola em Três de Maio, RS**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2004. 8p. (Circular Técnica Online 17).

TOMM, G.O. **Indicativos tecnológicos para produção de canola no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2007. 68p. (Embrapa Trigo. Sistemas de produção, 4).

WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, v. 58, n. 1, p. 01-24, 1998.

XU, M. et al. The effect of waterlogging on yield and seed quality at the earlyflowering stage in *Brassica napus* L. **Field Crops Research**, v.182, p.238-245, 2015.

ZANON, A.J. et al. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1447– 1454, 2016.

5. DISCUSSÃO GERAL

Os dois capítulos contemplados nessa tese buscaram relacionar a produtividade da canola com diferentes variáveis meteorológicas ao longo do subperíodo de florescimento. No capítulo 1, foram geradas informações acerca de qual estágio fenológico da canola possui maior correlação entre a média do quociente fototermal e a produtividade de genótipos de canola. De acordo com os resultados obtidos, maior correlação com a produtividade de grãos dos genótipos testados foi obtida a partir do quociente fototermal médio do subperíodo do início ao final do florescimento. Apesar desse resultado ser esperado, pois o subperíodo de florescimento é considerado sensível em muitas culturas, para a canola não havia essa informação. No milho por exemplo, o período que antecede a antese é sensível a alguns estresses, como por exemplo o déficit hídrico (BERGAMASCHI et al., 2006), sendo necessária a definição dos subperíodos de maior sensibilidade para cada cultura. A maior correlação da produtividade com a média do quociente fototermal (QF) no subperíodo de florescimento pode estar relacionada com a dinâmica de interceptação de radiação solar das estruturas reprodutivas. Na canola as síliquas são capazes de interceptar a radiação solar fotossinteticamente ativa (NIED, 2013), sendo uma estrutura que ao mesmo tempo é fonte e dreno de fotoassimilados. Outras justificativas para a maior sensibilidade desse subperíodo podem estar relacionadas com o hábito de crescimento indeterminado da canola, em que o florescimento se sobrepõe ao enchimento de grãos e a alta plasticidade da cultura, sendo capaz de compensar danos causados por algum estresse no florescimento que pode induzir a emissão de novas flores.

Esse trabalho propôs integrar ao quociente fototermal o cálculo da soma térmica, e avaliar qual o melhor método para estimar a produtividade da canola. De acordo com os resultados obtidos, a metodologia proposta por Fischer (1985) e modificada pela inclusão da soma térmica, apresentou maior correlação com a produtividade da canola. A partir desse resultado foi possível realizar e avaliar relações entre a produtividade e o QF modificado pela soma térmica. Para os três grupos de genótipos avaliados a resposta da produtividade de grãos da canola ao quociente fototermal foi semelhante, isto é, à medida que o QF aumenta a tendência é de que a produtividade também aumente, sendo os genótipos de maior ciclo os mais responsivos. Apesar das equações explicarem de 52 a 65% a variação da produtividade da canola, esse índice é de suma importância na

definição das datas de semeadura que visem a expressão do máximo potencial produtivo da canola.

As 46 datas de semeadura, estudadas no capítulo 2, expuseram a canola a diferentes condições ambientais, principalmente no que se refere à temperatura do ar, radiação solar incidente e precipitação pluviométrica, que são os elementos meteorológicos mais limitantes para a expressão da produção vegetal. Porém, apesar do amplo período de semeadura, não foi possível encontrar uma produtividade próxima do potencial máximo da cultura, pois em algum momento do ciclo provavelmente ocorreu algum estresse, seja térmico ou hídrico.

A resposta produtiva da canola à variação das condições meteorológicas é complexa e não pode ser explicada avaliando um elemento meteorológico separadamente, sendo necessário analisar o conjunto das interações que ocorreram ao longo do ciclo de desenvolvimento da canola. Apesar da alta variabilidade da produtividade da canola para uma mesma faixa das diferentes variáveis meteorológicas estudadas, foi possível estabelecer limites para cada faixa, a fim de estabelecer o valor máximo de produtividade obtido. De acordo com os resultados, identifica-se que a canola possui alta plasticidade produtiva, atingindo produtividades satisfatórias (acima da média nacional), mesmo em condições de estresses térmicos e hídricos.

O zoneamento agrícola da cultura da canola para o estado do Rio Grande do Sul possui o objetivo de identificar os municípios e os períodos de semeadura, em condições de baixo risco agroclimático no Estado do Rio Grande do Sul. Para a quantificação dos riscos associados a cultura da canola no zoneamento foram considerados somente dois critérios meteorológicos, o ISNA e a ocorrência de geadas da emergência ao estabelecimento da cultura e do florescimento ao início de enchimento dos grãos (BRASIL, 2021). Dentre os fatores meteorológicos que afetam diretamente o crescimento, desenvolvimento e produtividade de grãos da canola destacam-se a temperatura do ar (ROBERTSON et al., 2002; DALMAGO et al., 2010), a radiação solar incidente (THOMAS, 2003) e as condições hídricas do solo, como o excesso (TARTAGLIA et al., 2018) e o déficit hídrico (BILIBIO et al., 2011). Deste modo o zoneamento agrícola de risco climático da canola ainda abrange poucos efeitos que são limitantes à canola, e não abrange a produtividade real e potencial de grãos. Assim como o déficit hídrico, o excesso hídrico é limitante para o crescimento das plantas e é um estresse ambiental comum em áreas propensas a transbordamento de rios, precipitações pluviométricas frequentes e intensas, baixa drenagem do solo e altas flutuações no nível

do lençol freático (MIELKE; SCHAFFER, 2010), frequentes em muitas regiões de terras baixas do estado do Rio Grande do Sul (BURIOL, et al., 1980), principalmente durante o período de cultivo da canola. Deste modo, para maior refinamento ou detalhamento do zoneamento agrícola para canola cultivada no RS, o risco de ocorrência de excesso hídrico também deve ser considerado, principalmente na floração, que é um dos subperíodos mais sensíveis a esse estresse abiótico (TARTAGLIA et al., 2018). A radiação solar, quantificada através do quociente fototermal, também poderá ser utilizada no maior refinamento do zoneamento agrícola da canola, visto que é um índice agrometeorológico com correlação com a produtividade de grãos, podendo ser utilizado nos mesmos padrões que o ISNA. O maior refinamento do zoneamento agrícola da cultura da canola além de visar o aumento da área cultivada visa retorno econômico e social para as regiões produtoras.

Atualmente a produtividade da canola é muito variável e o cultivo dela é considerada de risco, devido principalmente aos estresses ambientais que ocorrem durante seu cultivo. O grande risco associado à cultura da canola e a alta variabilidade da produtividade média levaram muitos produtores a desistirem de investir na cultura, diminuindo assim a área de cultivo no Brasil (CONAB, 2022). Essa diminuição é muito negativa para o sistema de produção, pois a canola pode ser uma ótima opção de rotação com a cultura do trigo no inverno, com perspectiva de que a rotação trigo-canola aumente em média em 20 % a produtividade em relação ao cultivo trigo-trigo (PRITCHARD et al., 2007). Através da determinação da melhor data de semeadura para cada genótipo, conforme as previsões meteorológicas de médio prazo para a localidade é possível diminuir os possíveis riscos causados por condições meteorológicas adversas.

As maiores médias do quociente fototermal proposto por Fischer (1985) e modificado pela soma térmica foram obtidos no período da metade de abril até início de julho. O período de maior média do quociente fototermal no subperíodo IF-FF da canola observado no capítulo 1 contempla as datas de semeadura definidas como as que alcançaram maiores produtividades de canola no capítulo 2. A escolha da data de semeadura é um ponto chave no manejo das culturas agrícolas, sendo uma prática tecnológica que pode ser crucial para a maximização do potencial produtivo das culturas, sem que haja um aumento nos custos de produção. Os elementos meteorológicos e sua variabilidade interanual, associados às características do local exercem um grande controle na produtividade agrícola, interferindo em sua eficiência produtiva, pois a

produção final é função da produtividade potencial da cultura e sua interação com os elementos meteorológicos e tecnologia utilizada na produção.

Sob condições não controladas e normais de produção a campo, atribuir a produtividade da canola a somente uma variável meteorológica especificamente é pouco preciso. No entanto, os resultados permitem verificar que a canola demonstra ter potencial para elevadas produtividades em ampla faixa de condições ambientais ocorridas durante a floração. Trabalhos que avaliam como as variáveis ambientais afetam a produtividade máxima da canola em clima subtropical são importantes e devem ser aumentados, para assim propor técnicas de manejo que visem a sua potencialização. Nela se enquadram a densidade de plantas adequada, que vise a máxima interceptação da radiação solar, o uso de drenos ou irrigação suplementar para que os danos por estresses hídricos sejam diminuídos, além da escolha correta da data de semeadura de cada genótipo para evitar ou minimizar que estresses possam causar danos por coincidirem com os subperíodos mais sensíveis do ciclo dessa cultura agrícola. Esse tipo de estudo também pode fornecer informações para o planejamento de experimentos, direcionamento da variação genotípica para tolerância à estresses abióticos, além de ajudar a criar estratégias de adaptação para diminuir o impacto das mudanças climáticas na produtividade das culturas.

6. CONCLUSÕES

O subperíodo que demonstrou maior correlação entre o quociente fototermal médio e a produtividade de grãos de canola foi do início ao final do florescimento.

O quociente fototermal proposto por Fisher e modificado pela soma térmica do subperíodo de florescimento obteve maior correlação linear positiva com a produtividade de grãos de canola para todos os genótipos testados.

As datas de semeadura que propiciaram maiores valores de quociente fototermal médio durante o período de florescimento da canola foram as realizadas de 1 de 13 de maio a 15 de junho.

A produtividade máxima da canola é influenciada pela duração do subperíodo de florescimento, radiação solar, velocidade do vento, condições térmicas e hídricas no subperíodo de início de florescimento ao final do florescimento.

À medida que a temperatura do ar aumenta no subperíodo de florescimento há uma tendência linear de diminuição da produtividade máxima. Em relação a temperatura mínima absoluta a canola obteve elevadas produtividades mesmo em condições de geada.

A deficiência e o excesso hídrico são fatores estressantes às plantas de canola, demonstrando diminuição linear da produtividade máxima com o aumento desses estresses. Para cada 1 mm de déficit hídrico no subperíodo de início de florescimento ao final do florescimento ocorre perda de produtividade máxima de aproximadamente 30,6 kg ha⁻¹.

A resposta da produtividade máxima de grãos de canola é linear positiva à medida que o índice de satisfação das necessidades de água aumenta.

Máximas produtividades de grãos de canola foram obtidas em semeaduras realizadas de 24 de abril a 15 de junho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADI, M.; BAHRANI, M.J. Yield and yield components of rapeseed as influenced by water stress at different growth stages and nitrogen levels. **American-Eurasian Journal Agriculture & Environment Science**, v. 5, n. 6, p. 755-761, 2009.

ARAÚJO, L. N. et al. Tropicalization of canola: commercial hybrids show potential for cultivation in the Brazilian Cerrado. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo**, v. 53, n. 2, p. 20-26, 2021.

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. et al. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 243-249, 2006.

BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J.I. **As plantas e o clima: Princípios e aplicações**. Guaíba: Agrolivros, 2017, 352p.

BILIBIO, C. et al. Effect of different levels of water deficit on rapeseed (*Brassica napus* L.) crop. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 4, p. 672-684, 2011.

BOROVSKII, G.B.; STUPNIKOVA, I.V.; ANTIPINA, A.I.; VOINIKOV, V.K. Accumulation of dehydrins and ABA-inducible proteins in wheat seedlings during low-temperature acclimation. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 49, n. 2, p. 229-234, 2002.

BRASIL. Portaria Nº. 497 de 09 de novembro de 2021. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de canola, em sistema de cultivo de sequeiro, no Estado do Rio Grande do Sul**. Brasília (DF): Diário Oficial da União, 11 Nov. 2021, Seção 1.

BURIOL, G. A. et al. Disponibilidades hídricas do solo possíveis de ocorrerem no estado do Rio Grande do Sul. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 10 (suplemento), p. 1-141, 1980.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 9, safra 2021/22, n. 6 sexto levantamento,

março 2022. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos> > Acesso em: 15 Abr. 2022.

DALMAGO, G. A. et al. Canola. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. p. 131-149.

DALMAGO, G.A. et al. **Zoneamento Agroclimático para a canola do Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, Embrapa Trigo, 2008.76 p.

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.

DHILLON, S.S.; ORTIZ-MONASTERIO, J.I. **Effects of date of Sowing on the yield and yield components of spring wheat and their relationship with solar radiation and temperature at Ludhiana, Punjab, India**. Wheat special Report 23b. 1993.

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

DRECCER, M. F. et al. Comparison of sensitive stages of wheat, barley, canola, chickpea and field pea to temperature and water stress across Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 248, p. 275-294, 2018.

EMBRAPA. **Cultivo da canola**. 2014. Disponível em: < https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducao16_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=1&p_r_p_76293187_sistemaProducaoId=3703&p_r_p_996514994_topicoId=3024>. Acesso em: 15 jul. 2020.

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

FAOSTAT. **Food and agriculture organization of the United Nations**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/291/default.aspx>>. Acesso em: 20 Abr. 2022.

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

FOCHESATTO, E. et al. Interception of solar radiation by the productive structures of spring canola hybrids. **Ciência Rural**, v. 46, n. 10, p. 1790-1796, 2016.

FREITAS, C.; GARCIA, L.C. Perdas na colheita da canola em função das técnicas de manejo em pré-colheita. **Pesquisare**, v. 2, n. 1, p. 98, 2017.

GOUVÊA, J. A et al. Impacto dos fenômenos ENOS no rendimento de grãos da canola no Brasil. In: XX Congresso Brasileiro De Agrometeorologia, 2017, Juazeiro, Petrolina. **Anais...** Juazeiro: Univasf; Petrolina: Embrapa Semiárido, 2017. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1084442/1/ID442812017CBAGRO20AG407.pdf>>. Acesso: 18 Mai. 2022.

HERGERT, G.W. et al. Yield, irrigation response, and water productivity of deficit to fully irrigated spring canola. **Agricultural Water Management**, v. 168, p. 96-103, 2016.

KAEFER, J.E. et al. Produtividade de grãos e componentes de produção da canola de acordo com fontes e doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 4, p. 273-280, 2014.

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

MA Q. et al. Responses of osmotic adjustment and seed yield of *Brassica napus* and *B. juncea* to soil water deficit at different growth stages. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 57, n. 2, p. 221-226, 2006.

MARCHIORI JR., O. et al. Qualidade e produtividade de sementes de canola (*Brassica napus*) após aplicação de desseccantes em pré-colheita. **Planta daninha**, v. 20, n. 2, p. 253-261, 2002.

MELO-ABREU, J. P.; RIBEIRO, A. C. Os danos de geada: conceitos, mecanismos e modelos de simulação. **Clima e Recursos Naturais: Conferências de Homenagem ao professor Doutor Dionísio Gonçalves**, [S.1: s.n.], p.141-166, 2010.

MIELKE M.S.; SCHAFFER B. Photosynthetic and growth responses of *Eugenia uniflora* L. seedlings to soil flooding and light intensity. **Environmental and Experimental Botany**, v. 68, p. 113-121, 2010.

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

NIED, A.H. **Parâmetros bioclimáticos e resposta da canola ao ambiente físico**. 2013. 135f. Tese (Doutorado Fitotecnia/agrometeorologia) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

NOROUZI, M. et al. Effect of water deficit on growth, grain yield and osmotic adjustment in rapeseed. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 6, n. 2, p. 132-138, 2008.

PERBONI, A.T. et al. Chlorophyll a fluorescence study revealing effects of flooding in canola hybrids. **Biologia**, v. 67, n. 2, p. 338-346, 2012.

PEZESHKI, S.R. Wetland plant responses to soil flooding. **Environmental and Experimental Botany**, v. 46, p. 299-312, 2001.

PIZOLOTTO, C. A. et al. Manejos para redução de perdas em pré-colheita de canola sob elevada pluviosidade. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 2, p. 219-225, 2018.

PRITCHARD, F.D. et al. Challenges for irrigated canola. **IREC Farmers' Newsl.** v. 175, p. 1-7, 2007.

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

RATHKE, G.W. et al. Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations. **Field Crops Research**, v.94, p.103-113, 2005.

RICHARDS, R.A.; THURLING, N. Variation between and within species of rapeseed (*Brassica campestris* and *B. napus*) in response to drought stress. I. Sensitivity at different stages of development. **Australian Journal Agriculture Research**, v. 29, p. 469-477, 1978.

ROBERTSON, M.J.; et al. Growth and yield differences between triazine-tolerant and non-triazine-tolerant cultivars of canola. *Australian Journal of Agricultural Research*, v.53, p.643-651, 2002.

SANCHES, A.C. et al. Produtividade da canola sob irrigação e doses de adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 688-693, 2014.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

TARTAGLIA, F.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.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, RS, 2016.

THOMAS, P. **Canola grower's manual**. Winnipeg: Canola Council of Canada. 2003. Disponível em: <http://www.canolacouncil.org/canola_growers_manual.aspx>. Acesso em 20 mai. 2022.

THOMAS, P. **The growers' manual**: Canola Council of Canada, 2014. Acesso em 20 mai. 2022.

THORUP-KRISTENSEN, K. et al. Digging Deeper for Agricultural Resources, the Value of Deep Rooting. **Trends in Plant Science**, v.25, n. 4, p. 406-417.

TOMM, G. O. et al. **Panorama atual e indicações para aumento de eficiência da produção de canola no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. 27 p. (Embrapa Trigo. Documentos Online, 118). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do118.pdf>. Acesso em 12 Set. 2022.

TOMM, G. O. et al. **Tecnologia para produção de canola no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo. Embrapa Trigo, 2009. 88p.

VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e Climatologia. Versão Digital 2. Recife, 2006.

XIN, Z.; BROWSE, J. Cold comfort farm: the acclimation of plants to freezing temperatures. **Plant, Cell and Environment**, v. 23, p. 893-902, 2000.

APÊNDICE

APÊNDICE A -

APÊNDICE 1 – Umidade gravimétrica do limite inferior (LI), limite superior (LS), densidade média do solo (DS), capacidade de armazenamento de água disponível às plantas (CAD), dos solos de Passo Fundo, Santa Maria, Santo Ângelo e São Vicente do Sul nas diferentes camadas de solo em profundidade (Prof).

Prof (cm)	LI (g g ⁻¹)	LS (g g ⁻¹)	DS (g cm ⁻³)	CAD(mm)
Passo Fundo				
0 – 10	0,23	0,37	1,37	18,55
10 – 30	0,26	0,36	1,45	27,29
				45,84
Santa Maria				
0 – 10	0,08	0,23	1,18	17,12
10 – 20	0,08	0,24	1,17	17,76
				34,88
Santo Ângelo				
0 – 10	0,28	0,38	1,20	12,05
10 – 20	0,29	0,42	1,38	33,71
				45,76
São Vicente do Sul				
0 – 10	0,15	0,33	1,37	18,28
10 – 20	0,13	0,28	1,45	15,35
				33,63