

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

Daniella Moreira Salvadé

**CRESCIMENTO, DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE DE MILHO
SOB RESTRIÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR**

Santa Maria, RS
2023

Daniella Moreira Salvadé

**CRESCIMENTO, DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE DE MILHO SOB
RESTRIÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR**

Dissertação apresentada ao Curso 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 título de **Mestre em Agronomia**.

Orientador: Prof. Dr. Alencar Junior Zanon

Santa Maria, RS
2023

Salvadé, Daniella Moreira
CRESCIMENTO, DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE DE MILHO
SOB RESTRIÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR / Daniella Moreira
Salvadé.- 2023.
51 p.; 30 cm

Orientador: Alencar Junior Zanon
Coorientador: Astor Henrique Nied
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Agronomia, RS, 2023

1. Zea mays L. 2. Sombreamento 3. Época de semeadura
4. Mudanças climáticas 5. Manejo I. Junior Zanon, Alencar
II. Henrique Nied, Astor III. Título.

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

Declaro, DANIELLA MOREIRA SALVADÉ, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) 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.

Daniella Moreira Salvadé

**CRESCIMENTO, DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE DE MILHO SOB
RESTRIÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR**

Dissertação apresentada ao Curso 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 título de **Mestre em Agronomia**.

Aprovada em 18 de setembro de 2023

**Alencar Junior Zanon, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)**

Isabel Lago, Dra. (UFSM) - Videoconferência

Cleber Maus Alberto, Dr. (Unipampa) – Videoconferência

Santa Maria, RS
2023

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter guiado a minha vida e minha jornada profissional e acadêmica.

À minha família, minha mãe Beatriz, minha tia Janir e meu tio Juarez, por não medirem esforços para que este momento fosse possível de acontecer.

Ao meu irmão Antônio Raphael, minha cunhada Débora, e meus sobrinhos Pedro e Gabriel, pelo incentivo e apoio.

Aos meus orientadores Alencar Junior Zanon e Nereu Augusto Streck, por me guiarem na pesquisa, pelos conselhos e acreditarem em meu trabalho.

À Equipe FieldCrops, por me proporcionar momentos únicos de companheirismo e amizade, com todos contribuindo de alguma forma para o meu crescimento profissional e pessoal.

À Universidade Federal de Santa Maria, por todas as oportunidades desde o período de graduação.

Ao Programa de Pós Graduação em Agronomia da UFSM, pela vaga de mestrado.

Às minhas colegas Bruna San Martin Rolim Ribeiro e Isabela Pilleco, por toda ajuda, parceria e ensinamentos durante o período de mestrado.

Aos meus amigos Lucas, Augusto, Alexandre, Gabriela e Marcos, pelo incentivo e amizade.

À equipe milho, por não medirem esforços na condução dos experimentos, em especial a Victória Brittes, Álvaro Carnellosso, Gabriel Fortes, Gabriel Rocha e Tais Slim, pela ajuda em viagens e na condução dos experimentos e nas atividades da equipe.

Aos alunos de pós-graduação e graduação das culturas do trigo, arroz, soja e mandioca, pela ajuda nas separações de matéria seca, manutenção do sombrite, assim como, a ajuda prestada em momentos de alta demanda de mão de obra.

Aos meus colegas, amigos e consultores da Corteva e C.Vale, pelo incentivo ao longo dessa jornada.

À todas as pessoas que de uma forma ou outra participaram das atividades relacionadas a minha dissertação.

MUITO OBRIGADA!

EPÍGRAFE

“As nuvens mudam sempre de posição, mas são sempre nuvens no céu. Assim devemos ser todo dia, mutantes, porém leais com o que pensamos e sonhamos”.

(Paulo Beleki)

RESUMO

CRESCIMENTO, DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE DE MILHO SOB RESTRIÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR

AUTORA: Daniella Moreira Salvadé

ORIENTADOR: Alencar Junior Zanon

O milho é o cereal mais cultivado no mundo e o Brasil é o terceiro maior produtor. A cultura desempenha papel socioeconômico importante no Brasil e no mundo, sendo utilizado na alimentação animal, humana e na produção de bioetanol. Com o aumento da população mundial projetado para 9,6 bilhões de pessoas em 2050, o cereal também tem grande importância na segurança alimentar, sendo o principal grão utilizado a produção de ração animal. Projeções de futuros cenários de mudança climática, estimam declínio da disponibilidade de radiação solar, o que pode afetar negativamente o potencial de produtividade do milho. Assim, há que se compreender em qual fase de desenvolvimento a restrição de radiação solar impacta negativamente na produtividade de grãos para permitir a mitigação dos seus efeitos, fazendo adaptações no manejo da cultura. Assim, os objetivos deste estudo são: 1) avaliar as variáveis de crescimento das plantas de milho mais afetadas pela restrição de radiação solar; 2) quantificar a perda de produtividade de grãos de milho em virtude da restrição de radiação solar em diferentes datas de semeadura; e 3) determinar qual a fase de desenvolvimento do milho que apresenta maior perda de produtividade por restrição de radiação solar em ambiente subtropical. Para atender aos objetivos, foi realizado um experimento na safrinha de 2019/19 (Agudo), e safra em 2020/21 e 2021/22 (Santa Maria). Os tratamentos compreenderam restrição de 50% da radiação solar incidente: (1) da emergência até o número final de folhas (vegetativo); (2) pendramento até grão-bolha (reprodutivo); e (3) grão leitoso até maturidade fisiológica (enchimento de grãos). A restrição de radiação solar, ocasionou menor acúmulo de matéria seca (ADM) nas plantas de milho, principalmente na fase de enchimento de grãos, reduzindo em média 30%, onde o principal componentes de produtividade afetado foi o peso de mil grãos. A penalização na produtividade devido à restrição de radiação solar foi maior na fase de enchimento de grãos, seguida da fase reprodutiva, e por ultimo, a menos afetada, a fase vegetativa, reduzindo, em média, 4,84, 2,4 e 1,0 Mg ha⁻¹, o que corresponde a 36%, 18% e 4%, respectivamente, quando comparado a testemunha. A perda por dia nublado foi maior na fase de enchimento de grãos (356,4 kg ha⁻¹dia⁻¹), seguida da fase reprodutiva (202,7 kg ha⁻¹dia⁻¹) e vegetativa (28,1 kg ha⁻¹dia⁻¹). Estes resultados são importantes para otimizar o manejo de época de semeadura e para direcionar os programas de melhoramento genético na busca de cultivares mais eficientes no uso da radiação solar.

Palavras-chave: *Zea mays* L. Sombreamento. Época de semeadura. Mudanças climáticas. Manejo.

ABSTRACT

GROWTH, DEVELOPMENT AND YIELD OF MAIZE UNDER SOLAR RADIATION RESTRICTION

AUTHOR: Daniella Moreira Salvadé

ADVISOR: Alencar Junior Zanon

Maize is the most cultivated cereal in the world and Brazil is the third largest producer. The crop plays an important socioeconomic role in Brazil and around the world, being used in animal and human food and in the production of bioethanol. With the projected increase in the world population to 9.6 billion people in 2050, cereals also have great importance in food security, being the main grain used in the production of animal feed. Projections of future climate change scenarios estimate a decline in the availability of solar radiation, which could negatively affect maize productivity potential. Therefore, it is necessary to understand at which stage of development the restriction of solar radiation negatively impacts grain productivity to allow the mitigation of its effects, making adaptations in crop management. Thus, the objectives of this study are: 1) to evaluate the growth variables of maize plants most affected by solar radiation restriction; 2) quantify the loss of maize grain productivity due to the restriction of solar radiation on different sowing dates; and 3) determine which stage of maize development presents the greatest loss of productivity due to restriction of solar radiation in a subtropical environment. To meet the objectives, an experiment was carried out in the 2019/19 harvest (Agudo), and the 2020/21 and 2021/22 harvest (Santa Maria). The treatments included a 50% restriction of incident solar radiation: (1) from emergence to the final number of leaves (vegetative); (2) bolting to bubble grain (reproductive); and (3) milky grain until physiological maturity (grain filling). The restriction of solar radiation caused lower accumulation of dry matter (ADM) in maize plants, mainly in the grain filling phase, reducing on average 30%, where the main productivity component affected was the weight of a thousand grains. The penalty in productivity due to the restriction of solar radiation was greatest in the grain filling phase, followed by the reproductive phase, and lastly, the least affected, the vegetative phase, reducing, on average, 4.84, 2.4 and 1.0 Mg ha⁻¹, which corresponds to 36%, 18% and 4%, respectively, when compared to the control. The loss per cloudy day was greatest in the grain filling phase (356.4 kg ha⁻¹day⁻¹), followed by the reproductive phase (202.7 kg ha⁻¹day⁻¹) and vegetative phase (28.1 kg ha⁻¹day⁻¹). These results are important to optimize sowing time management and to direct genetic improvement programs in the search for cultivars that are more efficient in the use of solar radiation.

Keyword: *Zea mays L.* Sowing data. Climate changes. Manage.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos específicos	11
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1A	CULTURA DO MILHO	12
2.2	COMPONENTES DE PRODUTIVIDADE DO MILHO	14
2.3	RADIAÇÃO SOLAR E ÉPOCA DE SEMEADURA	15
2.4	IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA INCIDÊNCIA DE RADIAÇÃO SOLAR PARA O MILHO	16
2.5	O FENÔMENO EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL (ENOS)	16
3.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
3.1	Perda de produtividade de milho por estresse de sombreamento em ambiente subtropical	18
	Introdução	20
	Material e Métodos	22
	Resultados e Discussão	26
	Conclusão	32
	Referências	32
	Tabelas e Figuras	36
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
5.	REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

A população mundial vem crescendo significativamente, estima-se que atingirá 9,7 bilhões de pessoas em 2050 e a maior parte estará em áreas urbanas. Com isso, percebe-se a necessidade de aumentar a produção de alimentos de forma sustentável, ou seja, através do aumento da produtividade das culturas (LOBELL et al., 2009; SAATH FACHINELLO, 2018; VAN ITTERSUM et al., 2013). Aumentar a produtividade com o mínimo impacto ao meio ambiente é um desafio para garantir a segurança alimentar (HOU et al., 2020). Juntamente ao aumento populacional há também mudanças no estilo de vida, renda e hábito alimentar, fazendo com que o consumo de vegetais, frutas, carne, laticínios e peixes aumentem. Segundo a ONU (2012), a população mundial no ano de 2024 ultrapassaria os 8 bilhões de pessoas, porém este número já foi alcançado em 2023, e no relatório da FAO (2023) estimasse que 122 milhões de pessoas passam fome desde 2019. Para atender a esta demanda por alimentos é preciso aumentar a produção mundial em 70% com o aumento da eficiência dos sistemas produtivos, através da melhoria na gestão dos sistemas naturais (FAO, 2020). A forma mais eficiente para garantir a segurança alimentar mundial é aumentar o potencial de produtividade das culturas, buscar formas de adaptar a produção agrícola às mudanças climáticas e reduzir as lacunas de produtividade (SENAPATI; SEMENOV, 2020). O potencial de produtividade (Y_p) é a quantidade que uma cultivar pode produzir de acordo com a radiação solar incidente, água disponível, concentração de CO_2 atmosférico, temperatura do ar, sem que o suprimento de água e nutrientes sejam fatores limitantes para seu desenvolvimento e o estresse provocado por doenças, insetos e plantas daninhas seja inexistente (CASSMAN et al., 2003; EVANS, 1993; VAN ITTERSUM et al., 2013). Segundo Licker et al. (2010), se 95% da área agrícola mundial atingisse o potencial de produtividade, a produção global de milho, arroz, trigo e soja aumentaria em 50, 40, 60 e 20%, respectivamente.

O milho desempenha um papel socioeconômico importante, sendo uma das culturas mais produzidas no mundo, devido a sua composição química, valor nutricional e potencial produtivo (HOU et al., 2020; KRESOVIC et al., 2014). Seu alto valor energético faz com que seja o cereal mais utilizado para alimentação animal e humana, sendo considerado uma das culturas responsáveis pela segurança alimentar (FAO, 2020; PONCIANO et al., 2003). Na primeira safra, o potencial de produtividade de milho no Brasil varia de 13,6 a 17,8 $Mg\ ha^{-1}$, sendo os maiores valores encontrados no Sul do Brasil (RIBEIRO et al., 2020). Já o potencial de produtividade limitado por água varia de 5,7 a 15,1 $Mg\ ha^{-1}$, sendo maior na

Região Centro-Oeste do país. Isso ocorre porque na primeira safra a região Centro-Oeste apresenta melhor distribuição de chuvas, apesar da menor incidência de radiação solar.

A variabilidade do potencial de produtividade e da produtividade real de grãos de milho entre regiões e entre safras está associada a variações nos recursos e no ambiente, principalmente radiação solar e precipitação (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; YANG et al., 2021). Os efeitos da radiação solar no potencial de produtividade das culturas, em geral, é simulado através do uso de modelos matemáticos baseados em processos (NÓIA JÚNIOR et al., 2020; NÓIA JÚNIOR; SENDELHAS, 2019). O efeito da radiação solar está diretamente ligado a lacuna de produtividade, podendo este estar relacionado ao menor potencial de produtividade, devido a períodos de menor incidência de radiação solar, ou através do aumento da produtividade real das lavouras, o qual está associado a adoção de práticas de manejo adequadas, como escolha da data de semeadura e ciclo de desenvolvimento (LIU et al., 2012; PU et al., 2019; ZHAO et al., 2015). No entanto, poucos estudos mostram os efeitos da restrição da radiação solar na produtividade de milho através de experimentos de campo (YANG et al., 2021). Em análise realizada por STANHILL; COHEN, (2001), entre 1950 e 2000, foi notado um aumento dos gases de efeito estufa, vapor d'água e aerossóis na atmosfera, e junto a isso, está associado a redução da radiação solar, quantificado em 2,7% por década nos últimos 50 anos. Kanniah et al. (2013) trouxeram, que a mudança no regime de radiação solar afetaria diretamente a fotossíntese. Assim, estudar os efeitos da redução da radiação solar incidente é fundamental para compreender o impacto dessa restrição em cultivos de importância para a segurança alimentar, como o milho.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito da restrição de radiação solar sobre o crescimento, desenvolvimento e produtividade de milho.

1.1.2 Objetivos específicos

- 1) Determinar como o crescimento das plantas de milho é afetado pela restrição de radiação solar.

- 2) Quantificar a perda de produtividade de grãos de milho em virtude da restrição de radiação solar em diferentes datas de semeadura.
- 3) Determinar qual a fase de desenvolvimento do milho que apresenta maior perda de produtividade por restrição de radiação solar em ambiente subtropical.

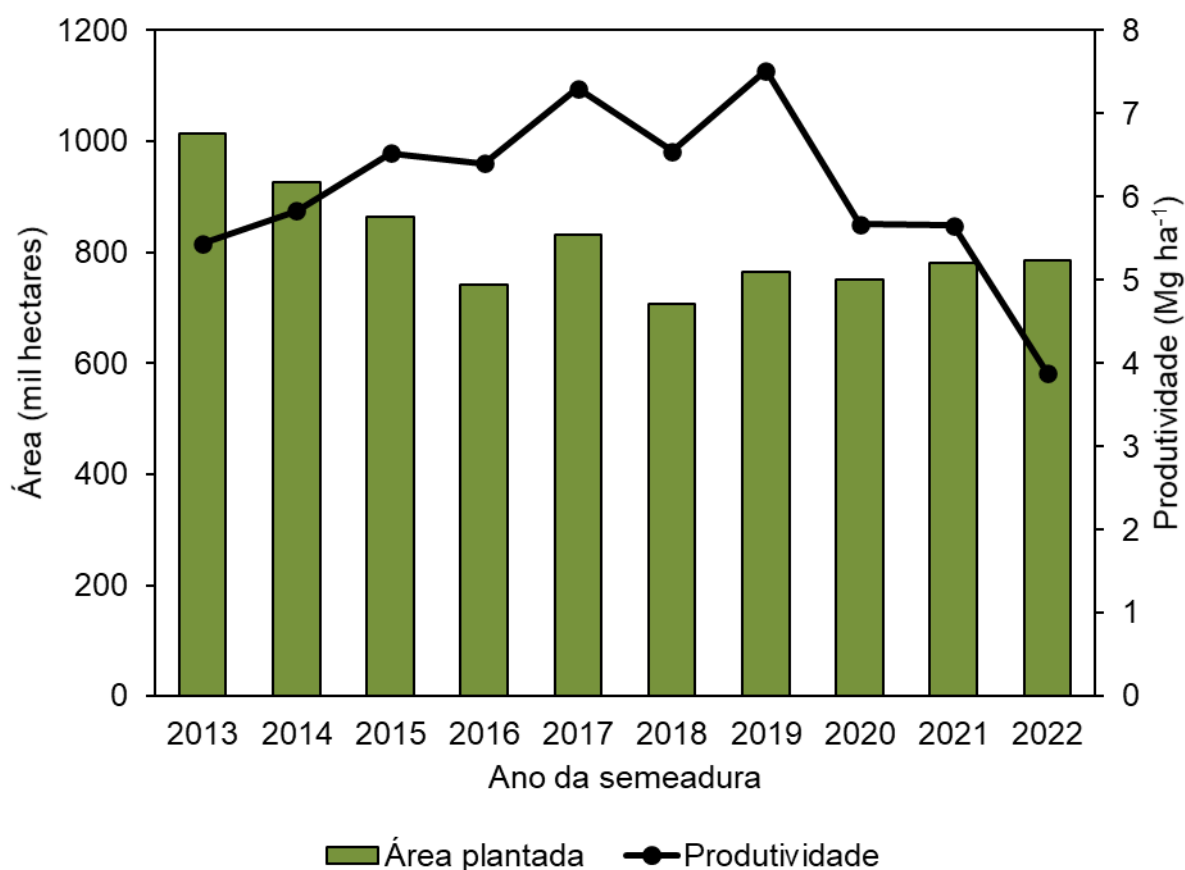
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A CULTURA DO MILHO

O aumento populacional, junto ao aumento do poder aquisitivo, afeta diretamente a demanda por alimentos e a mudança na dieta, incrementando o consumo per capita de alimentos de origem animal (MAUSER et al., 2015). Aproximadamente 75% da produção mundial de milho (*Zea Mays* L.) é destinada para a ração animal (SAH et al., 2020). O milho é o principal grão utilizado para a produção de ração, assim, pela competitividade do mercado brasileiro de carnes, a sua produção vem aumentando gradativamente (KOMATSU et al., 2019). Segundo dados do acompanhamento da safra brasileira de grãos, a cadeia produtiva do milho corresponde a 40,8% de toda a produção brasileira de grãos, sendo assim, uma das mais importantes do agronegócio brasileiro (CONAB, 2023a).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, perdendo apenas para Estados Unidos e China (USDA, 2023), com produção estimada de 131.8 milhões de toneladas de milho para a safra 2022/23. A Região Sul (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) é a segunda maior produtora de milho, e o Rio Grande do Sul é o sexto maior produtor do grão no país (CONAB, 2023b). Nos últimos anos, a área cultivada com milho no Rio Grande do Sul vem diminuindo (Figura 1), sendo que na safra 2018/19 a redução foi de 11%, em virtude da instabilidade de produção e preço. Porém, por mais que o milho tenha apresentado preço mais baixo, este grão faz parte dos insumos para pecuária, e o Rio Grande do Sul é o terceiro maior produtor de carne suína e de aves do Brasil, estando o milho incluído na dieta animal diária. No Rio Grande do Sul, 6,5 milhões de Mg de milho são consumidos, mas a produção anual média, dos últimos 10 anos foi de 5,1 milhões de Mg de milho por ano (CONAB, 2023b), assim, o restante para suprir a demanda por milho é proveniente de outros estados.

Figura 1 - Evolução da área cultivada e produtividade média de milho no Rio Grande do Sul, no período de 2013 a 2022.



Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

O milho é uma espécie que pertence à família Gramineae/Poaceae com origem no Golfo do México (POLL, 2005). A cultura possui ampla adaptabilidade a diferentes condições agroclimáticas, sendo cultivada em praticamente todo o globo, do nível do mar a altitudes superiores a três mil metros (SAH et al., 2020). É a cultura de grãos com a maior produtividade potencial existente (YANG et al., 2020). Por ser uma planta C4, possui alta eficiência luminosa, no entanto, precisa de adequada incidência de radiação solar durante todo o período de crescimento para expressar seu potencial (YANG et al., 2021).

Mesmo com a diminuição da área de milho, há aumento da produtividade nos últimos anos, com exceção das últimas três safras (2020/21, 2021/22 e 2022/23), devido a fortes secas que atingiram Sul do Brasil, atribuídas a ocorrência da fase negativa do fenômeno ENOS, conhecida como La nina. A produtividade média de grãos de milho nas últimas cinco safras (2018, 2019, 2020, 2021 e 2022) (Figura 1) foi de 5,8 Mg ha⁻¹. Assim, ainda há uma considerável lacuna entre a produtividade média obtida pelos produtores e as obtidas em áreas experimentais, onde foram encontradas produtividades de 14,4 a 17,8 Mg ha⁻¹ (ANDREA et al., 2018).

Devido as mudanças climáticas, está aumentando o número de estudos que

relacionam a produtividade do milho com os elementos climáticos (HE et al., 2020). Wang et al. (2015) estudaram o efeito dos elementos climáticos sobre o crescimento e produtividade de plantas do milho. Quando a cultura se encontra em condições ótimas para se desenvolver, ou seja, sem restrição de água, nutrientes, e sem a ação de pragas, doenças e plantas daninhas, a radiação solar, junto com a temperatura do ar, se tornam os principais determinantes do potencial produtivo da cultura (WILSON et al., 1995). Temperatura do ar e radiação solar tem impacto significativo sobre a produtividade de grãos de milho, no entanto, estudos recentes mostram que a restrição da radiação solar tem maior efeito na redução da produtividade do que a temperatura (YANG et al., 2018).

2.2 COMPONENTES DE PRODUTIVIDADE DO MILHO

A produtividade de milho é definida pelo número de grãos por unidade de área, ou pela massa individual de grãos, neste caso, quando a avaliação é realizada em pequena escala onde essa massa é influenciada pela taxa de enchimentos de grãos e pelo tempo de acúmulo de massa seca (WANG; ENGEL, 1998). As características genéticas das plantas determinam o seu potencial de crescimento e rendimento, onde estes, são impedidos de expressar o seu máximo, pelas limitações do meio (MÜLLER et al., 2001).

Durante a fase de desenvolvimento vegetativa da cultura do milho, o componente de produtividade que este sendo definido é o número de espigas por m^2 , número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira (SANGOI et al., 2010), e o número de plantas por m^2 , já definido previamente na semeadura da cultura. O componente de produtividade definido primeiramente é o número de plantas por m^2 (RIBEIRO et al., 2020), onde, segundo Sangoi et al. (2010), a correlação entre a produtividade de grãos e o número de plantas por m^2 é o principal componente de produtividade da cultura do milho. O número de fileiras por espiga é um componente definido no estágio V6 da cultura (6 folhas com o colar visível), posteriormente, em V8, será definido o número de grãos por fileira (RIBEIRO et al., 2020), onde este é influenciado por fatores de manejo e ambiente. A genética da cultivar interfere no número de fileiras por espiga (ABENDROTH et al., 2011), e projetando atingir altas produtividades, estudos trazem, que espigas com 14 fileiras seriam o ideal (RIBEIRO et al., 2020). Assim, o número final de grãos por espiga é resultado da multiplicação entre o número de fileiras e o número de grãos por fileira, onde estimasse que ideal seria em torno de 519 grãos por espiga.

Entre os estágios de VT (pendoamento) e R2 (grão-bolha), fases do desenvolvimento reprodutivo, continuam sendo definidos os componentes de produtividade, o número de

espigas por m² e número de grãos por fileira. O número de espigas está diretamente relacionado ao número de plantas por m² e ao ambiente, além das relações com a cultivar. Já em relação ao número grãos por fileira, os fatores que irão influenciar são o número de plantas pro há⁻¹, o ambiente e a área foliar da planta, sendo estes índices importantes que refletem a qualidade (LIU et al, 2017).

Por fim, nos estágios entre o R3 (grão leitoso) e o R6 (maturidade fisiológica), além dos componentes citados entre os estágios VT e R2, podemos dar significativa importância a massa de grãos, que estará sendo definida entre esses estágios (RIBEIRO et al., 2020). Segundo Andrade et al (1999), estresse por déficit hídrico e baixa disponibilidade de radiação solar podem causar perda de produtividade pois é neste período que está ocorrendo o processo de realocação da matéria seca para o enchimento de grão. A massa de grãos é afetada pelo fator área foliar e ambiente.

2.3 RADIAÇÃO SOLAR E ÉPOCA DE SEMEADURA

A fotossíntese é um dos processos mais importantes no crescimento e desenvolvimento vegetal (TAIZ et al., 2017). Devido ao fato da radiação solar ser a fonte de energia para esse processo, condições de limitação de radiação solar incidente no dossel influenciam negativamente a produtividade das culturas. Assim, a radiação solar é um componente muito importante na busca por altas produtividades de culturas agrícolas, além de ser um dos componentes que define o potencial de produtividade dos cultivos agrícolas (VAN ITTERSUM et al., 2013). A restrição da radiação solar afeta o processo fotossintético da planta, onde 90% da matéria seca do milho é proveniente da fixação de CO₂, causando perdas produtivas (CRUZ et al., 2020). Segundo He et al. (2020), a produtividade de milho é correlacionada positivamente com a radiação solar total. A redução de luminosidade pode afetar a maturação dos grãos, ocasionando assim redução da produtividade. (CRUZ et al., 2020; HAMMAD et al., 2016). Isso é explicado, pois, sob condições de baixa radiação solar, a taxa relativa de transferência de elétrons é reduzida, levando ao acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROS) e ao desequilíbrio do metabolismo celular (FENG et al., 2021). Isso pode levar a redução do número de cloroplastos por unidade de área foliar, além de modificações estruturais e baixo desenvolvimento nos cloroplastos existentes, reduzindo a taxa fotossintética, além de causar aceleração na senescência foliar (FENG et al., 2021; PENGELLY et al., 2010; YANG et al., 2021).

Correlacionando, a radiação solar com o período em que a planta de milho mais necessita da mesma, está a época de semeadura. A época de semeadura é a principal prática de manejo para otimizar a interceptação e uso da radiação solar (DUARTE et al., 2021). A escolha da época de semeadura, deve levar em consideração a genética da planta, fenologia e manejo (RIBEIRO et al., 2020). A época de semeadura adequada para determinada região deve possibilitar que o período de floração ocorra nos dias mais longos do ano e o enchimento de grãos em períodos com alta disponibilidade de radiação solar (CRUZ et al., 2020), quando a planta apresenta máxima área foliar. Segundo Andrea et al. (2018), a correta interação entre o manejo da cultura agrícola e os fatores ambientais irá resultar no aumento da produtividade. Portanto, a escolha adequada da época de semeadura é fundamental para obter a produtividade potencial de cada cultivar em cada região.

2.4 IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA INCIDÊNCIA DE RADIAÇÃO SOLAR PARA O MILHO

As emissões antrópicas de aerossóis e gases de efeito estufa (GEE) são crescentes ao longo das últimas décadas. A emissão de aerossóis tem impacto sobre o clima, pois, entre outros elementos, afeta a radiação solar através da absorção e dispersão, de acordo com sua composição (LIU, S. et al., 2019). Além disso, os aerossóis tem efeito indireto na radiação solar, através de alterações na física das nuvens, atuando na condensação dessas. Isso leva a redução da intensidade de radiação solar, o que pode ter impacto na produtividade das culturas agrícolas (LIU et al., 2012). Por isso, reduzir a emissão de aerossóis e mitigar as mudanças climáticas têm sido o objetivo de diversos estudos, conferências e acordos entre países.

A produção agrícola é intimamente afetada pelo clima e, por consequência, pelas mudanças climáticas. A seleção de cultivares adequadas pode aumentar a produtividade e reduzir as lacunas de produtividade atribuídas às variações de radiação solar em diferentes regiões (YANG et al., 2021). Dessa forma, estudos que auxiliem na compreensão dos efeitos da redução da radiação solar sobre a produtividade das culturas são cada vez mais importantes (BENDER; SENDELHAS, 2018; DIDONET et al., 2002; FENG et al., 2021; HAMMAD et al., 2016; NÓIA JÚNIOR; SENDELHAS, 2019; XU et al., 2017), inclusive para indicar caminhos para o melhoramento genético em condições de mudanças climáticas.

2.5 O FENÔMENO EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL (ENOS)

No Sul do Brasil, o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) é um dos principais responsáveis pela variabilidade climática e de produtividade das culturas (NÓIA JÚNIOR et al., 2020). O ENOS é um fenômeno atmosférico-oceânico caracterizado por anomalias da temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico Equatorial. Quando ocorrem anomalias positivas e superior a + 0,5°C, durante pelo menos três meses consecutivos, caracteriza-se uma safra sob influência da fase quente do ENOS ou El Niño. Já quando a anomalia é negativa e abaixo de -0,5°C durante esse período, ocorre a chamada fase fria ou La Niña. No Brasil, o fenômeno ENOS afeta de forma distinta as regiões tropicais e subtropicais. Em períodos de El Niño há mais probabilidade de chuvas acima da média no Sul do Brasil, já em períodos de La Niña, a probabilidade de ocorrência de secas são maiores (PENALBA; RIVERA, 2016). Altos volumes de chuva são associados à intensa nebulosidade, reduzindo a radiação solar para as lavouras (NÓIA JÚNIOR et al., 2020; NÓIA JÚNIOR; SENTELHAS, 2019). Zhong et al. (2014) apontam que a alta nebulosidade devido às condições extremas de chuva resultam em baixa radiação solar, o que afeta de forma negativa a formação de espigas e grãos de milho. Além disso, estudos indicam que em anos de El Niño, com chuvas acima da normal climatológica, há um atraso na época de semeadura das culturas de verão, o que impossibilita que a fase de enchimento de grãos das culturas coincida com os meses de maior disponibilidade de radiação solar (dezembro e janeiro) (NÓIA JÚNIOR; SENTELHAS, 2019).

Muitos estudos buscam compreender o efeito do fenômeno ENOS na produtividade média das lavouras de diferentes culturas no Sul da América do Sul, devido à forte influência desse fenômeno no clima da região (ARAMBURU MERLOS et al., 2015; ARSEGO et al., 2018; BERLATO; FARENZENA; FONTANA, 2005; DE LA CASA; OVANDO; DÍAZ, 2021; NÓIA JÚNIOR et al., 2020; PENALBA; RIVERA, 2016). A possibilidade de acesso a previsões de ocorrência de El Niño ou La Niña durante as safras agrícolas deve ser utilizada como estratégia de planejamento pelos produtores (BERLATO; FARENZENA; FONTANA, 2005). Reduzir as incertezas e os riscos associados a eventos climáticos aumenta a resiliência dos sistemas de produção e possibilitam a busca pela segurança alimentar (DE LA CASA; OVANDO; DÍAZ, 2019), o que é ainda mais importante para lavouras onde não há a possibilidade de irrigação, uma vez que a água é o principal fator limitante da produtividade em lavouras de sequeiro (GRASSINI; CASSMAN; ITTERSUM, 2017). No entanto, mesmo comparando diferentes safras sob a influência da mesma fase do fenômeno ENOS, há grande variabilidade, ocasionada pelas distintas intensidades de ocorrência e pela ampla complexidade de fatores que influenciam no clima (DE LA CASA; OVANDO; DÍAZ, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Perda de produtividade de milho por estresse de sombreamento em ambiente subtropical

(Será submetido para a revista PAB)

Perda de produtividade de milho por estresse de sombreamento em ambiente subtropical

Daniella Moreira Salvadé ⁽¹⁾, Isabela Bulegon Pilecco ⁽¹⁾, Álvaro Carnellosso ⁽¹⁾, Victória Brittes Inklman ⁽¹⁾, Astor Henrique Nied ⁽¹⁾ e Alencar Junior Zanon ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Fitotecnia, Prédio 77, Avenida Roraima, nº 1000, CEP 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: dani_salvade@hotmail.com, isabelabpilecco@gmail.com, alvarocarnellosso@gmail.com, victoriabrittes2@gmail.com, astor.nied@ufsm.br, alencarzanon@gmail.com.

Resumo: O potencial produtivo do milho é definido pela disponibilidade de radiação solar durante o ciclo de desenvolvimento da cultura. A redução da radiação solar devido às mudanças climáticas em anos de El Niño no sul do Brasil pode reduzir a produtividade do milho. Os objetivos deste estudo foram: 1) Determinar como o crescimento das plantas de milho é afetado pela restrição de radiação solar; 2) Determinar qual a fase de desenvolvimento do milho que apresenta maior perda de produtividade por restrição de radiação solar em ambiente subtropical; e 3) Quantificar a perda de produtividade de grãos de milho em virtude da restrição de radiação solar em diferentes datas de semeadura. Para isso, foi utilizado tela de sombreamento com 50% de restrição à radiação solar nas fases vegetativa, reprodutiva e enchimento de grãos, além de um tratamento testemunha sem restrição à radiação solar. Os experimentos foram conduzidos em 5 safras nos municípios de Agudo e Santa Maria, no Rio Grande do Sul, Brasil. O acúmulo de matéria seca foi penalizada nos 3 tratamentos com restrição de radiação solar, variando de 27,8 Mg ha⁻¹ a 14,7 Mg ha⁻¹. A produtividade de grãos de milho teve a maior penalização devido à restrição da radiação solar no enchimento de grãos (4,84 Mg ha⁻¹), seguida da reprodutiva (2,4 Mg ha⁻¹) e vegetativa (1,0 Mg ha⁻¹), sendo a fase de desenvolvimento de enchimento de grãos, a mais afetada em acúmulo de ADM e produtividade. Com base nisso, é possível otimizar a época de semeadura, orientando o manejo de acordo com as previsões

27 climáticas e direcionando programas de melhoramento genético na busca de cultivares mais eficientes
28 em ambientes com restrição de radiação solar.

29
30
31 **Palavras-chave:** *Zea Mays*, ENOS, época de semeadura, radiação solar.

32

33 **Introdução**

34

35 Há estimativas de que a população mundial será de 9,7 bilhões de habitantes em 2050. Dijk,
36 Van et al. (2021) identificaram que a demanda global total por alimentos, para suprir a necessidade
37 humana, deverá sofrer um crescimento em 56% até 2050, sendo ainda maior ao se considerar
38 cenários de mudança climática. As projeções para a agricultura nos próximos anos são preocupantes,
39 pois, além do aumento da demanda por alimentos, existe uma limitação de terras para expansão da
40 agricultura, isto atrelado a cenários de mudança climática, que irá exigir cada vez mais a adoção de
41 práticas menos agressivas do ponto de vista ambiental (Marin et al., 2016; Silva & Giller, 2020).
42 Outro importante tema relacionado às mudanças climáticas é a redução da radiação solar incidente.
43 Segundo Stanhill & Cohen (2001), entre os anos de 1950 e 2000, a redução em radiação solar
44 incidente foi 2,7%, devido ao aumento de gases de efeito estufa, vapor d'água e aerossóis na
45 atmosfera. Isso é preocupante do ponto de vista de produção de alimentos, já que a radiação solar está
46 entre os elementos meteorológicos de maior impacto na produtividade das culturas (Yang et al.,
47 2018). Assim, segundo Senapati & Semenov (2020), a eficiência em garantir a segurança alimentar
48 mundial envolve o aumento do potencial de produtividade das culturas, a busca por cultivares
49 adaptadas às mudanças climáticas e por formas de reduzir as lacunas de produtividade.

50 O potencial de produtividade (Y_p) é a produtividade obtida se a cultura não sofrer qualquer
51 limitação por água, nutrientes e não ocorrer a interferência de pragas, doenças e plantas daninhas. O
52 potencial de produtividade limitado por água (Y_w) é muito semelhante, no entanto sofre a influência
53 da disponibilidade e distribuição de água durante o ciclo (Van Ittersum et al., 2013). A lacuna de

54 produtividade (Y_g) é a diferença entre o potencial e a produtividade média (P_m) obtida nas lavouras
55 de uma determinada região. O milho desempenha importante papel na busca pela segurança
56 alimentar, sendo uma das culturas mais produzidas no mundo, devido à sua composição química,
57 valor nutricional e alto potencial produtivo (Luo et al., 2020). No Brasil, a lacuna de produtividade
58 de milho (diferença entre Y_w e Y_a) varia de 19 a 60% do Y_w na primeira safra e de 30 a 61% do Y_w
59 na segunda safra (Ribeiro et al., 2020). A variabilidade do potencial de produtividade, da
60 produtividade real e das lacunas de produtividade entre regiões e safras está associada a variações nos
61 recursos e no ambiente, principalmente radiação solar e precipitação (Lobell et al., 2009; LIU et al.,
62 2021).

63 O fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) é um dos principais responsáveis pela
64 variabilidade climática e de produtividade das culturas e ocorre de forma distinta na região tropical e
65 subtropical do país (Nóia Júnior et al., 2020). Na fase positiva (El Niño) há mais chances de chuvas
66 acima da média no Sul do Brasil (região subtropical) e, por consequência, maior número de dias
67 nublados. Já na fase negativa (La Niña), o efeito sobre a região Sul do Brasil é a maior chance de
68 ocorrência de secas, altas temperaturas e dias límpidos (Penalba & Rivera, 2016). A possibilidade de
69 acesso a previsões de ocorrência de El Niño ou La Niña durante as safras agrícolas deve ser utilizada
70 como estratégia de planejamento pelos produtores, que ao saberem o potencial de produtividade da
71 safra, podem adequar as práticas de manejo e investimento (Berlato et al., 2005; Grassini et al., 2017).

72 Estudos mostram o efeito da radiação solar na lacuna de produtividade, seja relacionado ao
73 menor potencial de produtividade, devido a períodos de menor incidência de radiação solar, ou através
74 do aumento da produtividade real das lavouras, associado a adoção de práticas de manejo adequadas,
75 como escolha da data de semeadura e ciclo de desenvolvimento (Liu et al., 2012; Zhao et al., 2015;
76 Pu et al., 2019). No entanto, poucos estudos mostram os efeitos da restrição da radiação solar na
77 produtividade de milho através de experimentos de campo (Yang et al., 2021). Estudar os efeitos da
78 restrição da radiação solar incidente a campo é fundamental para compreender o impacto de futuras
79 reduções na radiação solar sobre cultivos de importância para a segurança alimentar, como o milho.

80 Além disso, possibilitam compreender o impacto da maior quantidade de dias nublados que ocorre
81 em algumas safras, reduzindo as incertezas e os riscos produtivos associados a variabilidade climática
82 interanual. Por isso, o objetivo desse estudo foi: 1) Determinar como o crescimento das plantas de
83 milho é afetado pela restrição de radiação solar; 2) Determinar qual a fase de desenvolvimento do
84 milho que apresenta maior perda de produtividade por restrição de radiação solar em ambiente
85 subtropical; e 3) Quantificar a perda de produtividade de grãos de milho em virtude da restrição de
86 radiação solar em diferentes datas de semeadura.

87

88 **Material e Métodos**

89 O experimento foi conduzido em Agudo (Rio Grande do Sul, Brasil, lat.: 29°40' S; long.:
90 53°14' W; alt.: 83 m), na safrinha de 2019 (Figura 1b), e em Santa Maria (Rio Grande do Sul, Brasil,
91 lat.: 29°43' S; long.: 53°43' W; alt.: 95 m) nos anos de 2020 e 2021 (Figura 1a). O clima da região é
92 subtropical úmido (Cfa), segundo a classificação de Köppen. O solo das áreas é uma transição entre
93 a Unidade de Mapeamento São Pedro (Argissolo Vermelho distrófico) em Santa Maria, e a Unidade
94 de Mapeamento Vacacaí (Planossolo Háptico Eutrófico) em Agudo (Embrapa, 1999).

95 O efeito da radiação solar no desenvolvimento, crescimento e produtividade foi estudado
96 envolvendo cultivares de milho de alto rendimento amplamente plantadas em ambiente subtropical,
97 com ciclo superprecoce. Na safrinha de 2019 e na semeadura do mês de outubro de 2020, a cultivar
98 utilizada foi a Agroceres 9025 (AG9025). Já na semeadura de agosto, setembro e outubro de 2021, a
99 cultivar implementada foi a Brevant 2418 (B2418). As semeaduras foram realizadas sempre na
100 segunda quinzena do mês. A densidade de plantio foi de 90.000 plantas ha⁻¹, sendo realizado de forma
101 mecânica e com espaçamento de 0,5 m, na direção Leste-Oeste, evitando assim a incidência lateral
102 de radiação solar. O delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso, com 4 repetições e 4 tratamentos
103 em cada um dos blocos, resultando em 16 unidades experimentais em cada época de semeadura. As
104 parcelas experimentais tinham 33m² de tamanho, o qual para as avaliações, foram descartas as 2
105 fileiras laterais, resultando em uma área útil de 22m² por parcela. Parcelas adjacentes foram separadas

106 por um corredor com largura de 3 m. Os tratamentos foram impostos em diferentes anos e datas de
107 semeadura,

108 O manejo da cultura foi realizado de acordo com as recomendações técnicas, visando à
109 máxima expressão do potencial produtivo, mantendo-as livres de pragas, doenças e plantas daninhas.
110 A adubação foi realizada para alcançar altas produtividades. Assim, foi realizado a adubação de base,
111 e após, o nitrogênio e potássio parcelados nos estágios de V3 e V8. Quando necessário, a área foi
112 irrigada a partir de um pivô central.

113 Telas de malha preta que restringem em 50% a radiação solar incidente, foram utilizadas com
114 o objetivo de restringir a radiação solar e esse nível foi comparado com a radiação solar natural. No
115 tratamento denominado testemunha, a parcela não foi sombreada em nenhum momento pelas telas de
116 malha preta. A tela de malha preta, foi inserida a 0,5m acima do dossel das plantas de milho. Os
117 tratamentos foram iguais para as cinco datas de semeadura do experimento. O primeiro tratamento,
118 denominado “Vegetativo”, foi imposto quando as plantas estavam em fase de emergência, onde estas
119 ficaram sombreadas até o aparecimento da última folha expandida (última folha com o colar visível).
120 O segundo tratamento foi imposto quando as plantas apresentaram o pendão (VT) e continuou com
121 radiação solar restrita até o final do R2 (grão bolha), denominado “Reprodutivo”. O último tratamento
122 iniciou-se quando as plantas estavam no estágio R3 (grão leitoso) até o estágio R6 (maturação
123 fisiológica), denominado “Enchimento de grãos”. A duração do ciclo em cada tratamento, em dias,
124 está descrita na Tabela 1.

125 Dados meteorológicos de radiação solar (RadSol, em MJ m⁻² dia⁻¹, temperatura mínima e
126 máxima do ar (Tmax e Tmin, em °C), e precipitação (Prec, em mm), das safras de milho 2019/19,
127 2020/21 e 2021/22 foram obtidos da estação meteorológica do INMET (Instituto Nacional de
128 Meteorologia), instalada na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Rio Grande do Sul, a 1000
129 m do local do experimento conduzido em Santa Maria, a 50 km do experimento instalado em Agudo,

130 e foram completados pelo banco de dados NASA POWER. Os dados meteorológicos de três anos
131 estão resumidos na Figura 2.

132 Uma semana após a emergência, foram marcadas, de forma aleatória, com o uso de fitas
133 coloridas, três plantas da área útil de cada parcela para avaliações fenológicas, semanalmente,
134 utilizando a escala fenológica proposta por Ritchie, Hanway e Benson (1993). Uma folha foi
135 considerada expandida quando o seu colar estava visível, mas para o número total de folhas, foi
136 quantificado todas aquelas folhas que a ponta estava visível no cartucho (Streck et al., 2008).

137 O número de grãos por fileira, número de fileiras, número de grãos potencial e o peso de 1000
138 grãos, foram estimados a partir da colheita, quando os grãos na espiga já alcançaram o seu máximo
139 de acúmulo de peso e vigor. O número final de grãos por espiga foi definido pela associação do
140 número de fileiras por espiga e o número de grãos por fileira. A colheita é definida quando a linha
141 do amido avançou até a espiga e 50 % dos grãos da espiga demonstraram o aparecimento da camada
142 preta na ponta do grão, ou seja, quando atingiram a maturação fisiológica (Ribeiro et al., 2020). A
143 colheita foi realizada utilizando uma área útil de 5m² por unidade experimental, e posteriormente,
144 para determinação de produtividade, foram extrapolados para megagramas por hectare. Para as
145 determinações da produção da massa a partir da matéria seca, foram coletadas 5 plantas por parcela,
146 quando o milho se encontrava em R6, onde estas foram separadas em folhas, colmo, espiga e pendão,
147 e acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa com circulação forçada de ar a 60°C até peso
148 constante.

149 Foram utilizados dados meteorológicos médios diário de temperatura máxima, temperatura
150 mínima, precipitação e radiação solar para estabelecer a quantidade de radiação solar disponível em
151 um dia com restrição de radiação solar, e para o cálculo de amplitude térmica diária (ATD), a qual
152 foi estabelecida através da diferença entre Tmax e Tmin. Os 10% dos menores valores obtidos de
153 ATD foram comparados os valores de RadSol, que também foram os menores valores encontrados.
154 A RadSol (em porcentagem), que foi reduzida devido a presença de nuvens, variou de 59,9 a 62%

155 (Tabela 2), onde nas médias das três safras, foi reduzido em 60,82%, correspondendo a 9,21 MJ m⁻²
156 dia⁻¹.

157 Regressões lineares entre a produtividade e a radiação solar incidente foram utilizadas, onde
158 o coeficiente angular das retas indicou a produtividade por unidade de radiação solar incidente (Kg
159 MJ⁻¹). Para a determinação da produtividade média diária por fase (kg ha⁻¹ MJ dia⁻¹), primeiramente,
160 foi necessário determinar a média de duração das fases de desenvolvimento entre locais e estações de
161 crescimento na fase vegetativa (66 dias), reprodutiva (26 dias) e de enchimento de grãos (23 dias),
162 onde a relação entre o coeficiente angular e a duração da fase indicou a produtividade média diária
163 por fase. O produto entre produtividade média diária por fase e a quantidade de radiação solar média
164 por fase indicou a produtividade em um dia límpido. O produto entre a produtividade média diária
165 por fase e a quantidade de radiação solar média em um dia nublado (7,92 MJ m⁻²dia⁻¹) indicou a
166 produtividade em um dia nublado. A diferença entre a produtividade em dia límpido e a produtividade
167 em dia nublado, resultou na perda de produtividade por dia nublado.

168 Para a determinação do Coeficiente Fototérmico (Q), foram utilizados os dados médios de
169 radiação solar durante a fase de desenvolvimento, descontando a porcentagem de radiação solar que
170 foi restringida pelas telas de sombreamento, sendo calculado através dos dados obtidos das estações
171 meteorológicas, bem como os dados de temperatura ambiente, o qual não se observou diferença
172 significativa entre a temperatura no interior e no exterior das telas. A temperatura basal inferior (T_b)
173 do milho é de 10°C, e basal superior (T_B) de 36°C, assim, a T_b utilizada para quantificar o Q foi de
174 10°C.

175 As variáveis estudadas foram submetidas à teste de normalidade e, se atendidas as
176 pressuposições, foram submetidas à análise de variância. As variáveis qualitativas foram submetidas
177 ao teste de avaliação de médias (Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro) e as quantitativas foram
178 submetidas a análise de regressão.

179

Resultados e Discussão

180 O acúmulo de matéria seca (ADM) diminuiu conforme a implementação da restrição de
181 radiação solar. A fase mais afetada em acúmulo de matéria seca foi a fase de enchimento de grãos
182 (R3-R6), refletido, principalmente, em acúmulo de matéria seca em espiga, devido à redução em
183 produtividade através do PMG (Figura 3), quando comparado a testemunha, que não foi sombreada
184 em nenhum momento do seu ciclo. Em média, para todas as safras, o maior ADM foi observado no
185 tratamento sem restrição de radiação solar, com ADM de 27,8 Mg ha⁻¹ no estágio R6, na época de
186 semeadura de setembro de 2020 (Figura 3d). No tratamento com sombreamento na fase reprodutiva,
187 os valores de ADM total (folhas, colmo, espiga e pendão) foram de 14,7, 20,96, 20,46 e 14,7 Mg ha⁻¹
188 sob restrição de radiação solar, para as semeaduras de outubro/2020, agosto/2021, setembro/2021 e
189 outubro/2021, respectivamente, enquanto para a testemunha, esses valores foram de 24,3, 23,06, 27,8
190 e 19,93 Mg ha⁻¹ para as semeaduras de outubro/2020, agosto/2021, setembro/2021 e outubro/2021,
191 respectivamente. Quando a planta de milho foi sombreada na fase vegetativa, a mesma reduziu em
192 média 26,39% em ADM, quando comparada a testemunha.

193 Os menores valores de ADM foram encontrados quando as plantas de milho sofreram
194 restrição de radiação solar na fase corresponde entre R3 e R6 (enchimento de grãos), onde reduziu
195 em 36,24%, 12,55%, 27,45% e 22,25%, em relação a testemunha, que produziu 24,3, 23,06, 27,8 e
196 19,9 Mg ha⁻¹ de ADM, nas semeaduras de outubro/2020, agosto/2021, setembro/2021 e outubro/2021,
197 respectivamente. Esses resultados mostram que a restrição de radiação solar nas diferentes fases do
198 ciclo de desenvolvimento da cultura do milho têm interferência sobre a produção de biomassa pela
199 cultura. Resultados similares foram encontrados por Cui et al. (2015) relatam que em experimentos
200 onde o milho foi submetido a regimes de sombreamento, houve uma redução de cerca de 66%
201 significativa sobre o acúmulo de matéria seca, quando restringido durante todo o seu ciclo. Em outro
202 estudo com milho, onde foram utilizadas telas de malha preta que permitiam a passagem de 50% da
203 radiação solar, provocou diferentes reações nas culturas estudadas, onde a produção de matéria seca
204 foi maior em plantas cultivadas em ambientes externos quando comparadas com plantas cultivadas

205 em ambiente sombreado (Lacerda et al., 2010). Chen & Pang, (2020) trazem que a luz interceptada
206 pelo dossel, as taxas fotossintéticas, as quantidades de matéria seca de diferentes órgãos diminuíram
207 conforme diminuiu a radiação solar. Para Yang et al. (2021), nos estádios de espigamento e
208 maturidade, as quantidades de matéria seca em cada órgão diminuíram com a diminuição da radiação
209 solar. O mesmo estudo traz, que em comparação ao tratamento com plena radiação solar, a ADM
210 reduziu 25,5% na China no ano de 2019. Em tempos atuais, com o aumento da frequência de eventos
211 climáticos extremos, pesquisas sobre esse aspecto devem ser enfatizadas no futuro.

212 Durante as safras 2020/21 e 2021/22, foi analisados o desenvolvimento da cultura do milho,
213 utilizando a escala fenológica proposta por Ritchie, Hanway e Benson (1993). Não foi observado
214 diferença estatística significativa entre a testemunha e os tratamentos com 50% de restrição à radiação
215 solar. A maior diferença foi observada quando as plantas de milho foram sombreadas durante a sua
216 fase vegetativa, variando de 1 a 6 dias a mais no ciclo. Todavia, quando se tem um período curto entre
217 a safra de verão e a safra da cultura subsequente, na prática, a diferença de 6 dias ou mais pode se
218 tornar uma perda ao produtor.

219 A radiação solar, quando restringida durante a fase vegetativa da cultura do milho, que neste
220 caso, corresponde desde a sua emergência até o início do pendoamento, causou um baixo acúmulo e
221 distribuição de matéria seca das plantas de milho. Porém, apenas para o milho semeado no mês de
222 agosto de 2021, foi observado redução significativa em produtividade nesta fase ($1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), o qual
223 apresentou um menor NGE e PMG (Figura 5c e 6c). A restrição da radiação solar na fase vegetativa
224 causou uma redução de NGE em 15%. Porém, a planta compensou em PMG, onde o mesmo
225 apresentou uma queda de apenas 6%, responsável pela queda de rendimento de 4%. Isso ocorreu
226 devido a reestabilização das condições favoráveis para a planta dar continuidade no seu ciclo, ou seja,
227 condições normais de radiação solar incidente durante as fases subsequentes, reprodutiva e de
228 enchimento de grão. Com menor crescimento da planta, ou seja, emissão de novas folhas, os
229 fotoassimilados são redistribuídos para outras estruturas morfológicas, como aumento da área foliar
230 e altura da planta (Deng et al., 2015; Wang et al., 2015). A redução da produtividade devido à restrição

231 da radiação solar na fase vegetativa deve-se ao menor acúmulo de matéria seca, em consequência, as
232 plantas de milho redistribuíram seus fotoassimilados para outras estruturas durante a fase reprodutiva,
233 atingindo altos valores de produção de grãos, e uma penalidade não significativa em número de grãos
234 e peso de mil grãos.

235 A restrição à radiação solar na fase reprodutiva reduziu 15% o NGE e 16% o PMG, causando
236 uma queda de produtividade de 18%. Como o principal componente limitante da produtividade
237 (NGE), é definido após a floração, é neste ponto que a cultura deixa de produzir mais grãos devido à
238 restrição da radiação solar. Wang et al. (2015), em trabalho realizado na região subtropical da China,
239 trouxe que a produtividade perdida pela restrição de radiação solar pode chegar a 50% quando se tem
240 perda de 48% no NGE, principalmente, em sombreamento ocorrido por 30 dias após a floração.
241 Segundo Yang et al. (2020), quanto maior a radiação solar durante o enchimento de grãos, maior o
242 rendimento de grãos. Isso indica que as atuais cultivares de milho, cultivadas em ambiente subtropical
243 penalizam a produtividade, principalmente pela diminuição no número de grãos por espiga.

244 Durante a fase de enchimento de grãos, a produtividade de grãos reduziu em 42,8%, 27,8%,
245 31,7%, 33,3% e 52,3%, para as semeaduras ocorridas em janeiro/2019, outubro/2020, agosto/2021,
246 setembro/2021 e outubro/2021, respectivamente, assim, reduzindo na média de todas as datas de
247 semeadura cerca de 37,58%. É durante a fase de enchimento de grãos que está sendo definido um
248 componente de produtividade do milho, a massa de grãos, onde conseqüentemente, devido ao estresse
249 causado sobre a planta durante o sombreamento, a mesma não realocou a sua biomassa para os grãos.
250 Foi encontrado para as 5 datas de semeadura, valores de PMG, em média, com 16% menos acúmulo
251 e distribuição de massa, quando comparado com a testemunha. Na semeadura ocorrida em outubro
252 de 2020, a redução do PMG foi de 29% quando comparado a testemunha. Estudo realizado na China,
253 traz que a fase de grão leitoso (R3), é a fase de desenvolvimento do milho mais sensível a temperatura
254 e radiação solar (Chen & Pang, 2020). Xue et al. (2016) traz que o manejo da época de semeadura é
255 um fator que pode atenuar esses efeitos, onde com a antecipação da semeadura, conseqüentemente,

256 vai ocorrer o prolongamento da fase vegetativa devido ao efeito de temperaturas mais baixas,
257 proporcionando mais tempo para o acúmulo de fotoassimilados.

258 Neste estudo, foi possível identificar que a produtividade de milho é afetada pela mudança da
259 radiação solar de formas diferentes conforme a fase de imposição da restrição e em diferentes datas
260 de semeadura. A safra 2021/22 (8,9 Mg ha⁻¹) apresentou produtividade média superior à safra 2019/19
261 e 2020/21 (6,03 Mg ha⁻¹ e 6,58 Mg ha⁻¹, respectivamente) (Tabela 1), a qual foi a mesma safra que
262 apresentou a maior média de radiação solar (22,56 MJ m⁻²dia⁻¹) (Tabela 2). Na safra 2020/21, o maior
263 volume de chuvas no mês de janeiro, coincidiu com o período que as plantas de milho mais
264 necessitaram de radiação solar disponível, assim consequentemente, a taxa fotossintética do milho foi
265 reduzida (Figura 2). Segundo Deng et al. (2009) e Li et al. (2020), com a menor capacidade das
266 plantas em drenar nutrientes, resulta em menor produtividade. Na semeadura de outubro da safra
267 2021/22, é possível verificar a mesma tendência, onde também se observou maior volume de chuvas
268 no mês de janeiro, e consequentemente, maior período de restrição de radiação solar ocasionado pelo
269 recobrimento do céu pelas nuvens. Nas semeaduras ocorridas nos meses de agosto e setembro de
270 2021, a tendência foi de baixos volumes de chuva nos meses que a cultura se encontrava nas fases
271 reprodutiva e de enchimento de grãos assim, médias de radiação solar maiores, e consequentemente,
272 maiores produtividades. Nas safras 2019/19, 2020/21 e 2021/22, a produtividade dos tratamentos com
273 restrição de radiação solar variou entre 3,1 e 11,8 Mg ha⁻¹, com perdas por restrição de radiação solar
274 de 52,3% e 4,06%, respectivamente (Tabela1). Na safra 2019/19 e 2020/21, o PMG foi 29% e 12%
275 menor, respectivamente, e o NGE foi 30% menor para as duas safras, em comparação a safra 2021/22,
276 justificando a diferença de produtividade entre as safras.

277 A maior produtividade de grãos de milho foi observada sem restrição na radiação solar,
278 reduzindo conforme a fase do estresse de restrição à radiação solar. A fase mais crítica foi o
279 enchimento de grãos, que representou uma redução de produtividade de 4,1 Mg ha⁻¹, 3,7 Mg ha⁻¹, 3,4
280 Mg ha⁻¹, 3,3 Mg ha⁻¹ e 1,96 Mg ha⁻¹, nas datas de semeadura de setembro/2021, agosto/2021,
281 outubro/2021, janeiro de 2019 e outubro de 2020, respectivamente. Para a restrição na fase

282 reprodutiva, a redução de produtividade foi de 3,4 Mg ha⁻¹, 2,4 Mg ha⁻¹ e 1,4 Mg ha⁻¹ para as datas
283 de semeadura de janeiro/2019, setembro/2021 e agosto/2021, respectivamente, e não apresentou
284 diferença significativa para as semeaduras ocorridas em outubro/2020 e outubro/2021. Por outro lado,
285 para a fase vegetativa, a redução de produtividade só foi significativa na semeadura ocorrida no mês
286 de agosto/2021, sendo de 1,0 Mg ha⁻¹ (Figura 4c). Esses valores indicam que a fase de enchimento
287 de grãos é o principal processo afetado pela restrição à radiação solar e limita o Yp das cultivares de
288 milho, reduzindo a massa de grãos.

289 As perdas em produtividade por dia nublado foram de 28,1 kg ha⁻¹ dia⁻¹, 205,7 kg ha⁻¹ dia⁻¹ e
290 356,4 kg ha⁻¹ dia⁻¹ nas fases vegetativa, reprodutiva e de enchimento de grãos, respectivamente
291 (Tabela 3), ou seja, o coeficiente angular da regressão linear traz que a maior produtividade por
292 unidade de radiação solar ocorre de entre R3 e R6 da escala fenológica do milho (659 kg MJ m⁻²dia⁻¹
293 ¹). Isto se deve pelo motivo de que entre as fases de R3 a R6 da cultura do milho, esta sendo definido
294 o componente de produtividade massa de grãos, sendo este, um dos componentes mais limitantes.

295 A variação do coeficiente fototérmico ficou entre 0,37 e 1,85 MJ m⁻²dia⁻¹°C, o qual indica que
296 maiores valores de Q estão relacionados com maior rendimento de grãos de milho (Figura 7). Esses
297 resultados estão de acordo com a faixa de Q encontrada por Didonet et al. (2002). Outros trabalhos,
298 relacionaram o Q para explicar a variação de rendimento e componentes de rendimento com
299 condições ambientais (Ahmed et al., 2010; Ahmed et al., 2011; Cantagallo et al., 1997; Lazaro &
300 Abbate, 2011; Magrin et al., 1997; la., 1993; Poggio et al., 2005; Tagliapietra et al., 2021; Zanon et
301 al., 2016), mas não analisam o Q nas diferentes fases de desenvolvimento, que tornou a análise menos
302 precisa.

303 O enchimento de grãos foi a fase de desenvolvimento mais responsiva ao Q, seguida pelas
304 fases reprodutiva e vegetativa. Regressões lineares entre rendimento e Q indicam que 1 MJ m⁻²dia⁻¹
305 °C corresponde a 11,8 Mg ha⁻¹, 11,64 Mg ha⁻¹ e 15,45 Mg ha⁻¹ nas fases denominadas vegetativas,
306 reprodutivas e de enchimento de grãos no ambiente subtropical do Brasil, respectivamente (Figura

307 7). Esses resultados corroboram com o encontrado por Didonet et al. (2002), realizados em Coxilha,
308 RS, onde foi observada uma correlação positiva entre rendimento e radiação solar, onde maiores
309 rendimentos foram encontrados em plantios que coincidem com os maiores coeficientes fototérmicos.
310 Segundos Didonet et al. (2002), isso é resultado da maior taxa de crescimento da cultura, ou seja, um
311 maior número de grãos definidos por unidade de taxa de crescimento.

312 Segundo Ahmed et al. (2011), Deng et al. (2015) e Peng et al. (2004), a radiação solar
313 incidente é fator determinante para altas produtividades de culturas agrícolas, onde na fase de
314 enchimento de grãos contribuem significativamente para maximizar a produtividade e relatam que
315 rendimentos mais baixos estão associados ao efeito de um aumento na temperatura noturna. Ainda,
316 indicam que há relação negativa entre o aumento das temperaturas mínimas e a produção de biomassa
317 Essa penalidade ocorre, fisiologicamente, devido ao aumento da respiração da planta, principalmente
318 a noturna, o que gera maior perda de carbono que poderia ser utilizado para o enchimento dos grãos
319 (Impa et al., 2021), destacando a importância entre a relação do Q e a produtividade, e que a mesma
320 seja avaliada ao longo do desenvolvimento da cultura, uma vez que a demanda por radiação solar vai
321 variar conforme a fase da cultura.

322 Até onde se sabe, este é o primeiro estudo a mostrar perda de rendimento por dia nublado em
323 milho cultivado em ambiente subtropical. Resultados como estes, obtidos neste estudo, são
324 necessários para orientar programas de melhoramento vegetal no aprimoramento e busca de cultivares
325 que sejam mais eficientes na questão de aproveitamento da radiação solar disponível, principalmente
326 quando se fala em aproveitamento na fase reprodutiva da cultura.

327 Atualmente, estudos que relacionam o fornecimento de luz para lavouras, estão se tornando
328 comuns, sendo assim, no futuro, quando as lavouras geralmente fornecem luz solar artificial, os
329 resultados desse trabalho serão usados por técnicos e agricultores para decidir quando
330 complementar em dias nublados. Essas abordagens integradas requerem planejamento antecipado
331 e são essenciais para explorar as lacunas de produtividade no ambiente subtropical do Brasil.

332

Conclusão

- 333 1. O acúmulo de matéria seca de milho é afetada pela restrição de radiação solar nos 3 tratamentos,
334 principalmente, no tratamento que corresponde a fase de enchimento de grãos da cultura;
- 335 2. A fase de desenvolvimento do milho mais afetada pela restrição de radiação solar em ambiente
336 subtropical é o enchimento de grãos, seguido pelas fases reprodutivas e vegetativa.
- 337 3. A perda de produtividade em milho nas fases de enchimento de grão, reprodutiva e vegetativa foi,
338 em média, 4,84, 2,4 e 1,0 Mg ha⁻¹, respectivamente, quando comparado a testemunha.

339

340

341

Referências

- 342 AHMED, M.; ASIM, M.; ASLAM, M.; & AKRAM, M. N. Correlation of photothermal quotient
343 with spring wheat yield. **African Journal of Biotechnology**, 9(46), 869-7852, 2010. DOI:
344 10.5897/AJB10.1288.
- 345
- 346 AHMED, M.; HASSAN, F. U., RAZZAQ, A., AKRAM, M. N., ASLAM, M., AHMAD, S., &
347 ZIA-UL-HAQ, M. Is photothermal quotient determinant factor for spring wheat yield? **Pak J Bot**,
348 43(3), 1621-1622, 2011.
- 349
- 350 BERLATO, M.A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D.C. Association between El Niño Southern
351 Oscillation and corn yield in Rio Grande do Sul State. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v.40,
352 p.423–432, 2005. DOI: 10.1590/s0100-204x2005000500001.
- 353
- 354 CANTAGALLO, J. E.; CHIMENTI, C. A.; & HALL, A. J. Number of seeds per unit area in
355 sunflower correlates well with a photothermal quotient. **Crop Science**, 37(6), 1780-1786, 1997.
356 DOI: 10.2135/cropsci1997.0011183X003700060020x.
- 357
- 358 CHEN, C.; PANG, Y. Response of maize yield to climate change in Sichuan province,
359 China. **Global Ecology and Conservation**, v. 22, p. e00893, 2020.
- 360
- 361 CUI, H. Y.; CAMBERATO, J.J.; JIN, L.; ZHANG, J. Efeitos do sombreamento na diferenciação de
362 espigas e formação de rendimento de grãos de milho de verão no campo. **International Journal of**
363 **Biometeorology**, 59 , 1189-1200, 2015. DOI: 10.1007/s00484-014-0930-5.
- 364
- 365 CUTFORTH, H.W.; SHAYKEWICH, C.F. A temperature response function for corn
366 development. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.50, p.159-171, 1990
- 367
- 368 DENG, F.; WANG, L.; YAO, X.; WANG, J. J.; REN, W. J.; & YANG, W. Y. Effects of different-
369 growing-stage shading on rice grain-filling and yield. **Journal of Sichuan Agricultural**
370 **University**, 27(3), 265-269, 2009.
- 371
- 372 DENG, N.; LING, X.; SUN, Y.; ZHANG, C.; FAHAD, S.; PENG, S.; HUANG, J. Influence of
373 temperature and solar radiation on grain yield and quality in irrigated rice system. **European**
374 **Journal of Agronomy**, 64, 37-46, 2015. DOI: 10.1016/j.eja.2014.12.008

375
376 DIJK, M. VAN; MORLEY, T.; RAU, M.L.; SAGHAI, Y. A meta-analysis of projected global food
377 demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. **Nature Food**, v.2, p.494–501,
378 2021. DOI: 10.1038/s43016-021-00322-9.
379
380 GAO, J.; ZHAO, B., DONG, S.; LIU, P.; REN, B.; & ZHANG, J. Response of summer maize
381 photosynthate accumulation and distribution to shading stress assessed by using ¹³C₂ stable
382 isotope tracer in the field. **Frontiers in Plant Science** , 8 , 1821, 2017.
383 DOI:10.3389/fpls.2017.01821.
384
385 GRASSINI, P.; CASSMAN, K.G.; ITTERSUM, M. VAN. Exploring maize intensification with the
386 Global Yield Gap Atlas. **Better Crops with Plant Food**, v.101, p.7–9, 2017.
387
388 IMPA, S. M.; RAJU, B.; HEIN, N. T.; SANDHU, J.; PRASAD, P. V.; WALIA, H.; & JAGADISH,
389 S. K. High night temperature effects on wheat and rice: Current status and way forward. **Plant, Cell
& Environment**, 44(7), 2049–2065, 2021. DOI: 0.1111/pce.14028.
390
391
392 ITTERSUM, M.K. VAN; CASSMAN, K.G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.;
393 HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. **Field Crops
394 Research**, v.143, p.4–17, 2013. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.09.009.
395
396 LACERDA, C. F.; DE CARVALHO, C. M.; VIEIRA, M. R., NOBRE, J. G.; NEVES, A. L.;
397 RODRIGUES, C. F. . Análise de crescimento de milho e feijão sob diferentes condições de
398 sombreamento. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 18-24, 2010.
399
400 LÁZARO, L.; & ABBATE, P. E. Cultivar effects on relationship between grain number and
401 photothermal quotient or spike dry weight in wheat. **The Journal of Agricultural Science**, 150(4),
402 442-459, 2012. DOI: 20.1017/S0021859611000736.
403
404 LI, Q. P.; DENG, F.; CHEN, H.; ZENG, Y. L.; LI, B.; ZHONG, X. Y.;REN, W. J. Shading
405 decreases rice yield by impeding grain-filling progress after heading. **Agronomy Journal**.
406 112:4018–4030, 2020. DOI:10.1002/agj2.20372.
407
408 LIU, G. ZHOU; LIU, W. MAO; HOU, P.; MING, B.; YANG, Y. SHAN; GUO, X. XIA; XIE, R.
409 ZHI; WANG, K. RU; LI, S. KUN. Reducing maize yield gap by matching plant density and solar
410 radiation. **Journal of Integrative Agriculture**, v.20, p.363–370, 2021. DOI: 10.1016/S2095-
411 3119(20)63363-9.
412
413 LIU, Z.; YANG, X.; HUBBARD, K.G.; LIN, X. Maize potential yields and yield gaps in the
414 changing climate of northeast China. **Global Change Biology**, v.18, p.3441–3454, 2012. DOI:
415 10.1111/j.1365-2486.2012.02774.x.
416
417 LOBELL, D.B.; CASSMAN, K.G.; FIELD, C.B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes,
418 and Causes. **Annual Review of Environment and Resources**, v.34, p.179–204, 2009. DOI:
419 10.1146/annurev.environ.041008.093740.
420
421 LUO, N.; WANG, X.; HOU, J.; WANG, Y.; WANG, P.; MENG, Q. Agronomic optimal plant
422 density for yield improvement in the major maize regions of China. **Crop Science**, v.60, p.1580–
423 1590, 2020. DOI: 10.1002/csc2.20000.
424
425 MAGRIN, G. O., HALL, A. J., BALDY, C. H., & GRONDONA, M. O. Spatial and interannual
426 variations in the photothermal quotient: implications for the potential kernel number of wheat crops

427 in Argentina. **Agricultural and Forest Meteorology**, 67(1-2), 29-41, 1993. DOI:10.1016/0168-
428 1923(93)90048-M

429

430 MARIN, F.R.; PILAU, F.G.; PILAU3, F.R.M.F.G.; SPOLADOR, H.F.S.; OTTO, R.; PEDREIRA,
431 C.G.S. Intensificação sustentável da agricultura brasileira Cenários para 2050. **Política Agrícola**,
432 v.3, p.108–124, 2016.

433

434 NÓIA JÚNIOR, R. DE S.; FRAISSE, C.W.; KARREI, M.A.Z.; CERBARO, V.A.; PERONDI, D.
435 Effects of the El Niño Southern Oscillation phenomenon and sowing dates on soybean yield and on
436 the occurrence of extreme weather events in southern Brazil. **Agricultural and Forest**
437 **Meteorology**, v.290, p.108038, 2020. DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.108038.

438

439 PENALBA, O.C.; RIVERA, J.A. Precipitation response to El Niño/La Niña events in Southern
440 South America - Emphasis in regional drought occurrences. **Advances in Geosciences**, v.42, p.1–
441 14, 2016. DOI: 10.5194/adgeo-42-1-2016.

442

443 PENG, S.; HUANG, J.; SHEEHY, J. E.; LAZA, R. C.; VISPERAS, R. M.; ZHONG, X;
444 CASSMAN, K. G. Rice yields decline with higher night temperature from global warming.
445 **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 101(27), 9971-9975, 2004. DOI:
446 10.1073/pnas.0403720101.

447

448 POGGIO, S. L.; SATORRE, E. H.; DETHIOU, S.; GONZALO, G. M. Pod and seed numbers as a
449 function of photothermal quotient during the seed set period of field pea (*Pisum sativum*) crops.
450 **European Journal**, 2005. DOI: 10.1016/j.eja.2003.12.003.

451

452 PU, L.; ZHANG, S.; YANG, J.; CHANG, L.; BAI, S. Spatio-temporal dynamics of maize potential
453 yield and yield gaps in northeast China from 1990 to 2015. **International Journal of**
454 **Environmental Research and Public Health**, v.16, 2019. DOI: 10.3390/ijerph16071211.

455

456 RIBEIRO, B. S. M. R. et al. **Ecofisiologia do milho visando altas produtividades**. Santa Maria,
457 RS: Palloti/SM, 2020. 230 p.

458

459 RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. How a corn plant develops. **Special Bulletin**,
460 **Iowa**, n. 48. 1993.

461

462 SENAPATI, N.; SEMENOV, M.A. Large genetic yield potential and genetic yield gap estimated
463 for wheat in Europe. **Global Food Security**, v.24, p.100340, 2020. DOI:
464 10.1016/j.gfs.2019.100340.

465

466 SILVA, J.V.; GILLER, K.E. Grand challenges for the 21st century: What crop models can and
467 can't (yet) do. **Journal of Agricultural Science**, v.158, p.794–805, 2020. DOI:
468 10.1017/S0021859621000150.

469

470 STANHILL, G.; COHEN, S. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and
471 significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible
472 agricultural consequences. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.107, p.255–278, 2001. DOI:
473 10.1016/S0168-1923(00)00241-0.

474

475 STRECK, N.A.; PAULA, G.M.; CAMERA, C.; MENEZES, N.L.; LAGO, I. Estimativa do
476 plastocrono em cultivares de soja. **Bragantia**, v.67, p.67-73, 2008.

477

478 TAGLIAPIETRA, E.L.; ZANON, A.J.; STRECK, N.A.; BALEST, D.S.; ROSA, S.L. ;BEXAIRA,
479 K.P.; RICHTER, G.L.; RIBAS, G.G.; SILVA, M.R.. Biophysical and management factors causing
480 yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. **Agronomy Journal**, v.113, p.1882–1894, 2021.
481 DOI: 10.1002/agj2.20586.

482

483 WANG, L.; DENG, F.; & REN, W. J. Shading tolerance in rice is related to better light harvesting
484 and use efficiency and grain filling rate during grain filling period. **Field Crops Research**, 180, 54-
485 62, 2015. DOI:10.1016/j.fcr.2015.05.010.

486

487 XUE, J., GOU, L., ZHAO, Y., YAO, M., YAO, H., TIAN, J., & ZHANG, W. Effects of light
488 intensity within the canopy on maize lodging. **Field Crops Research** , 188 , 133-141, 2016. DOI:
489 10.1016/j.fcr.2016.01.003.

490

491 YANG, P.Y.; HU, Q.; MA, X.Q.; HU, L.T.; REN, F.Y.; YAN, M.L.; HUANG, B.X.; PAN, X.B.;
492 HE, Q.J. Spatiotemporal variation of heat and solar resources and its impact on summer maize in
493 the north China plain over the period 1961–2015. **Chinese Journal of Agrometeorology**, v.39,
494 p.431–441, 2018. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2018.07.001.

495

496 YANG, Y.; GUO, X.; HOU, P.; XUE, J.; LIU, G.; LIU, W.; LI, S.. Quantitative effects of solar
497 radiation on maize lodging resistance mechanical properties. **Field Crops Research**, v. 255, p. 148-
498 159, 2020. DOI: 10.1016/j.fcr.2020.107906

499

500 YANG, Y.; SHAN; GUO, X. XIA; LIU, H. FANG; LIU, G. ZHOU; LIU, W. MAO; MING, B.;
501 XIE, R. ZHI; WANG, K. RU; HOU, P.; LI, S. KUN. The effect of solar radiation change on the
502 maize yield gap from the perspectives of dry matter accumulation and distribution. **Journal of**
503 **Integrative Agriculture**, v.20, p.482–493, 2021. DOI: 10.1016/S2095-3119(20)63581-X.

504

505 ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; & GRASSINI, P. Climate and management factors influence
506 soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, 108, 1447–1454, 2016.
507 DOI: 10.2134/agronj2015.0535.

508

509 ZHAO, Y.; CHEN, X.P.; CUI, Z.L.; LOBELL, D.B. Using satellite remote sensing to understand
510 maize yield gaps in the North China Plain. **Field Crops Research**, v.183, p.31–42, 2015. DOI:
511 10.1016/j.fcr.2015.07.004.

512

514 **Tabela 1.** Experimentos de milho conduzidos em 2019/19, 2020/21 e 2021/22, com telas de malha preta com 50% restrição de radiação solar em
 515 Agudo/RS (2019/19) e Santa Maria/RS (2020/21 e 2021/ 22).

Local	Estação de crescimento	Cultivar	Data de semeadura	Tratamento	Duração do ciclo (dias)	Grãos por espiga	CV (%)	Peso de 1000 grãos (g)	CV (%)	Produtividade (Mg ha ⁻¹)	
Agudo	2019/19*	AG9025	28/01/2019	Testemunha	*	377,6a	8,1	235,0a	4,8	7,7a	
				Vegetativo	*	375,3ab		219,8a		7,7a	
				Reprodutivo	*	318,1bc		197,8b		4,3b	
				Enchimento de grãos	*	307,1c		180,9b		4,4b	
Santa Maria	2020/21	AG9025	27/10/2020	Testemunha	115	419,4a	5,7	279,7a	8,7	7,06a	
				Vegetativo	118	345,5b		329,7a		7,15a	
				Reprodutivo	115	316,8b		222,4b		7a	
				Enchimento de grãos	118	274,3c		198,5b		5,1b	
	2021/22	B2418	23/09/2021	31/08/2021	Testemunha	118	494,2a	4,6	297,8a	4,4	11,7a
					Vegetativo	124	438,5b		318,2b		10,7b
					Reprodutivo	118	419,4b		293,9b		10,3b
					Enchimento de grãos	120	425,6b		258,2c		7,99c
	2021/22	B2418	23/09/2021	15/10/2021	Testemunha	116	487,6a	5,6	287,9a	3,0	12,3a
					Vegetativo	117	457,5a		302,5ab		11,8a
					Reprodutivo	116	461,5a		283,0b		9,9b
					Enchimento de grãos	118	404,4b		266,2c		8,2c
2021/22	B2418	23/09/2021	15/10/2021	Testemunha	102	572,3a	6,6	283,5 a	3,7	6,5a	
				Vegetativo	106	389,5c		286,0b		6,1a	
				Reprodutivo	102	510,6b		249,1c		5,7a	
				Enchimento de grãos	104	470,0b		238,1 c		3,1b	

517 **Tabela 2.** Estimativa de radiação solar incidente disponível em um dia nublado e porcentagem da
 518 redução de RadSol em ambiente subtropical durante as estações de crescimento 2020/21 e 2021/22.

Local	Estação de crescimento	Data de semeadura	RadSol média ¹ (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	RadSol média em um dia nublado ² (MJ m ⁻² dia ⁻¹ °C)	Redução de RadSol (%)
Agudo	2019/19	28/1/19	16,01	6,41	59,9
	2021/21	27/10/20	17,93	7,55	57,9
Santa Maria		31/8/21	20,40	7,59	62,8
	2021/22	23/9/21	23,47	8,82	62,4
		15/10/21	23,82	9,26	61,11

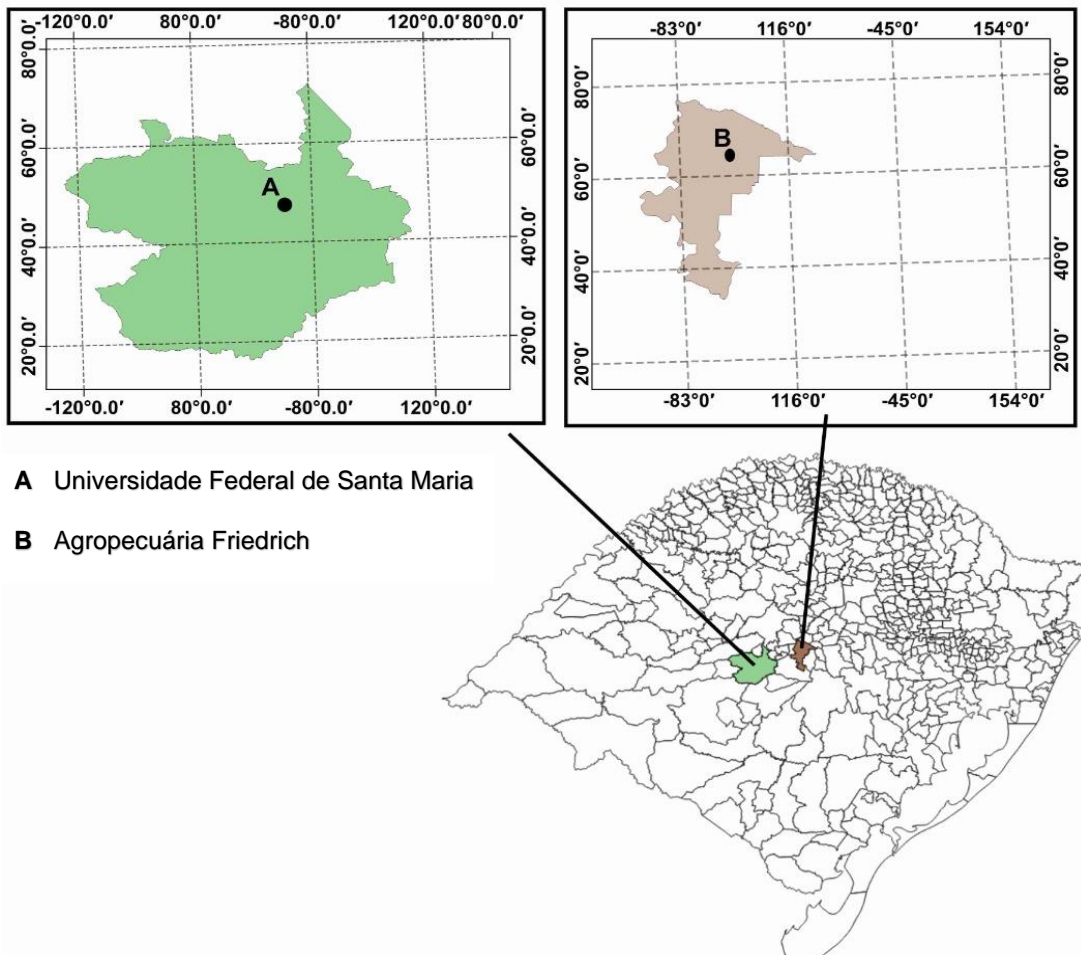
519 ¹A RadSol média da safra foi contabilizada a partir da semeadura até a data da colheita. ²A RadSol média em
 520 um dia nublado corresponde à média de RadSol nos dias das menores ATD.

521

522 **Tabela 3.** Perda de produtividade por dia nublado nas fases de desenvolvimento vegetativa,
 523 reprodutiva e de enchimento de grãos durante a estação de crescimento 2019/2020 em Agudo,
 524 semeadura em outubro/2020, semeadura em agosto/2021, semeadura em setembro/2021 e semeadura
 525 em outubro/2021 em Santa Maria, em ambiente subtropical.

Fase	Produtividade total da fase (kg MJ ⁻¹)	Produtividade diária (kg MJ ⁻¹ dia ⁻¹)	Produtividade em dia límpido	Produtividade em dia nublado	Perda de produtividade por dia nublado
			kg ha ⁻¹ dia ⁻¹		
Vegetativa	149	2,3	45,96	17,88	28,1
Reprodutiva	430	16,5	336,72	130,98	205,7
Enchimento de grãos	659	28,7	583,36	226,93	356,4

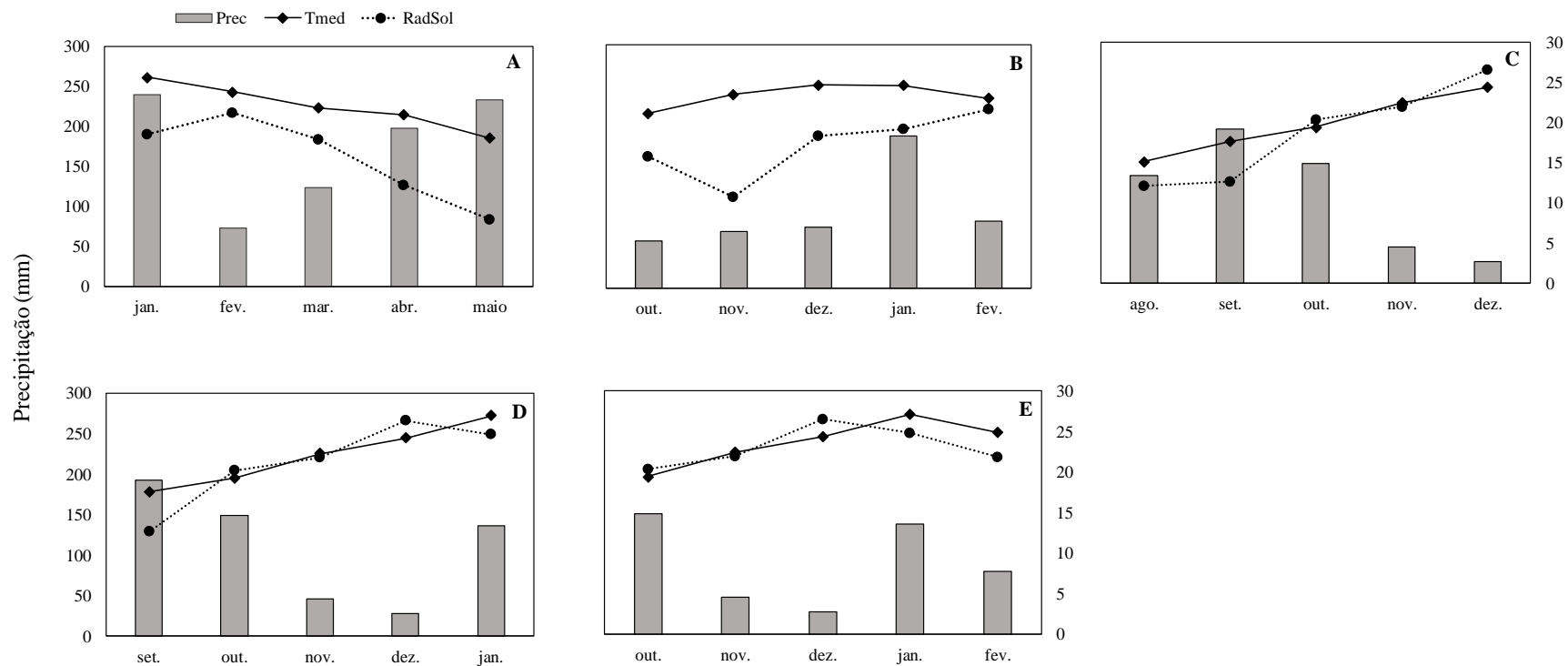
526



527

528 **Figura 1.** Localização do estado do Rio Grande do Sul (Brasil), (A) com a localização da área
 529 experimental na Universidade Federal de Santa Maria (safras 2020/21 e 2021/22) em Santa Maria, e
 530 (B) Agropecuária Friedrich (safra 2019/19) em Agudo.

531



Radiação solar incidente (MJ m⁻² dia⁻¹); Temperatura média do ar (°C)

532

533

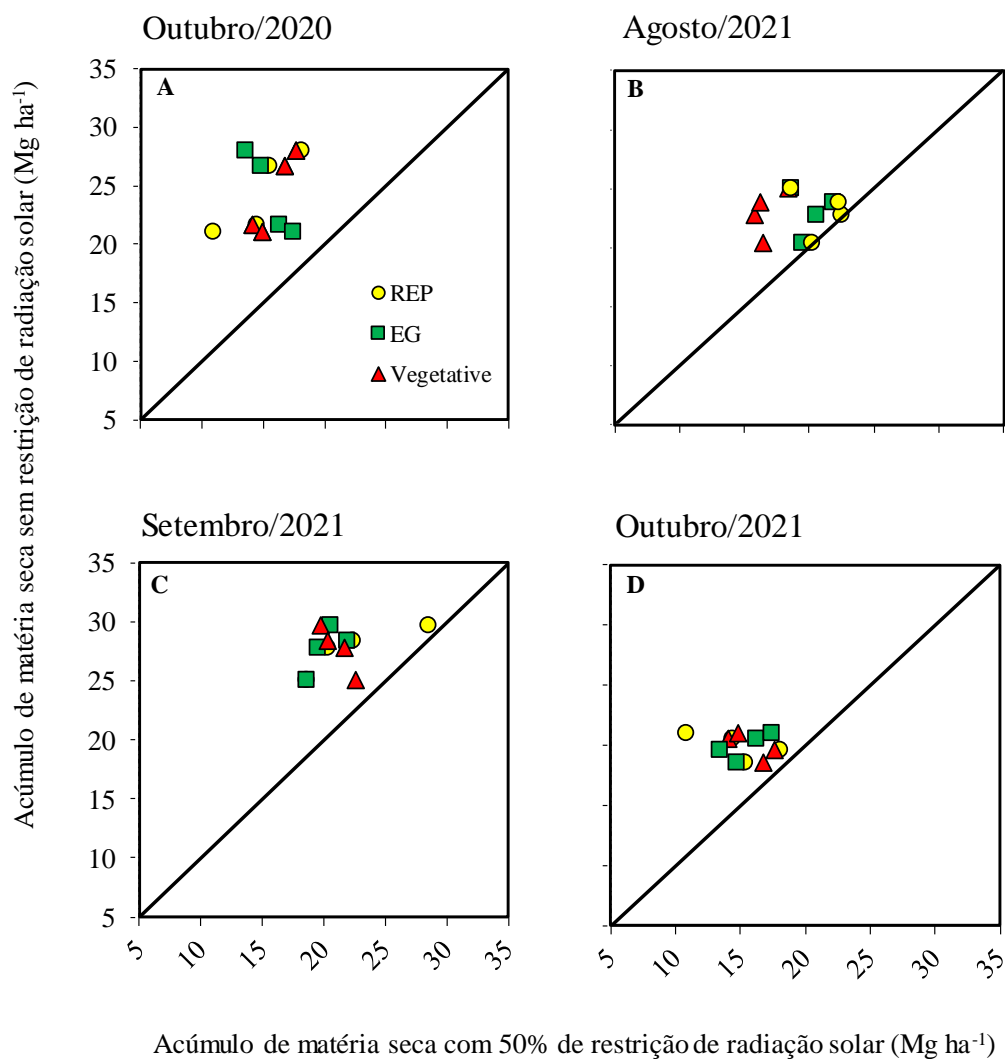
534

535

536

537

Figura 2. Radiação solar global incidente (RadSol, em MJ m⁻² dia⁻¹), Temperatura média do ar, em °C e Precipitação pluviométrica (Prec, em mm) durante a estação de crescimento 2019/2020 em Agudo (A), semeadura em outubro/2020 (B), semeadura em Agosto/2021 (C), semeadura em setembro/2021(D), e semeadura em outubro/2021 (E) em Santa Maria. As curvas de RadSol (pontilhada) e Tmed (contínua) estão relacionadas com o eixo Y secundário da direita, enquanto as colunas que indicam a Prec estão relacionadas com o eixo Y esquerdo.

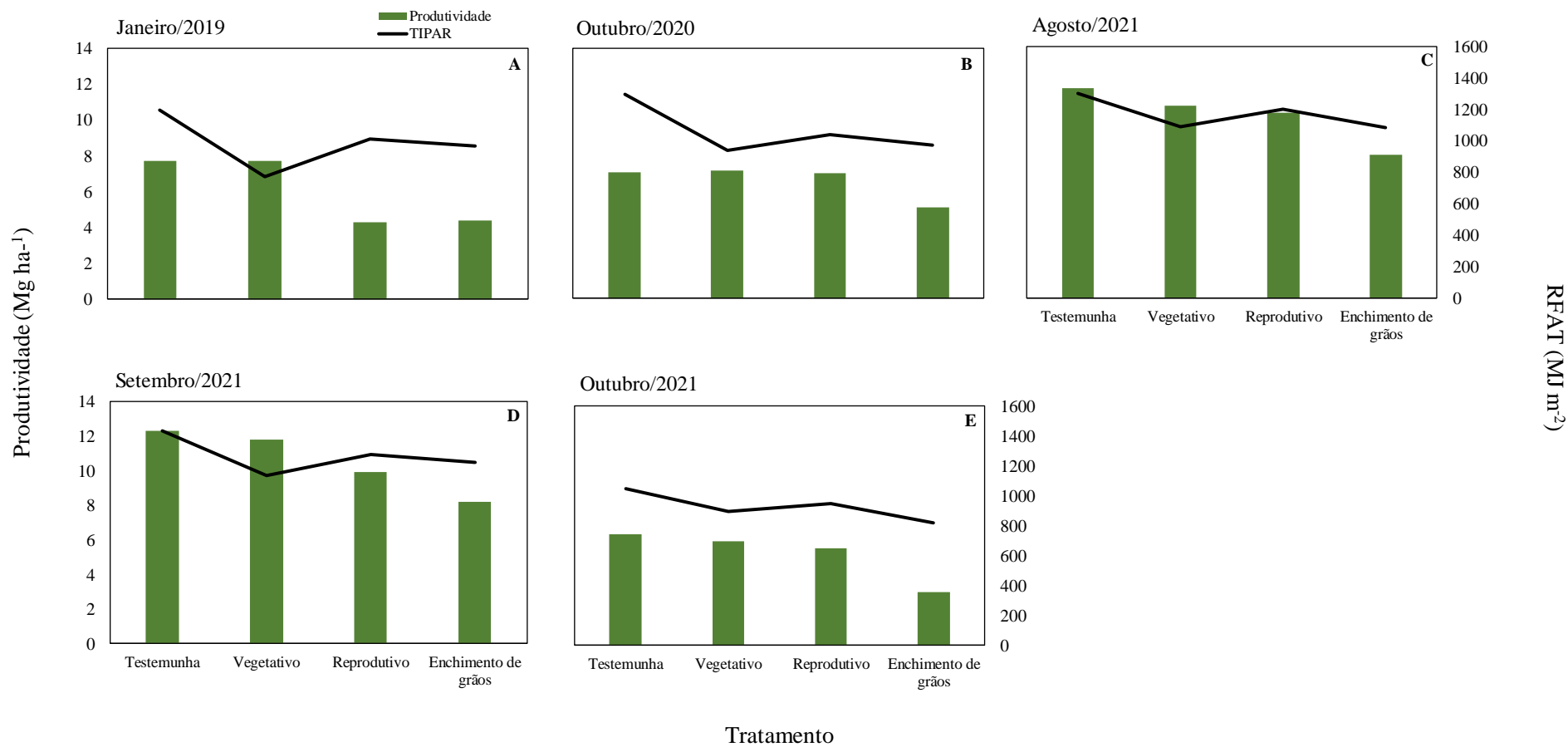


538

539 **Figura 3.** Acúmulo de matéria seca de cultivares de milho com e sem restrição de radiação solar em
 540 outubro/2020, agosto/2021, setembro/2021 e outubro/2021. Sombreamento em vegetativo (símbolos
 541 vermelhos), reprodutivo (símbolos amarelos) e enchimento de grãos (símbolos verdes). A linha
 542 diagonal sólida em cada gráfico indica a hipótese nula.

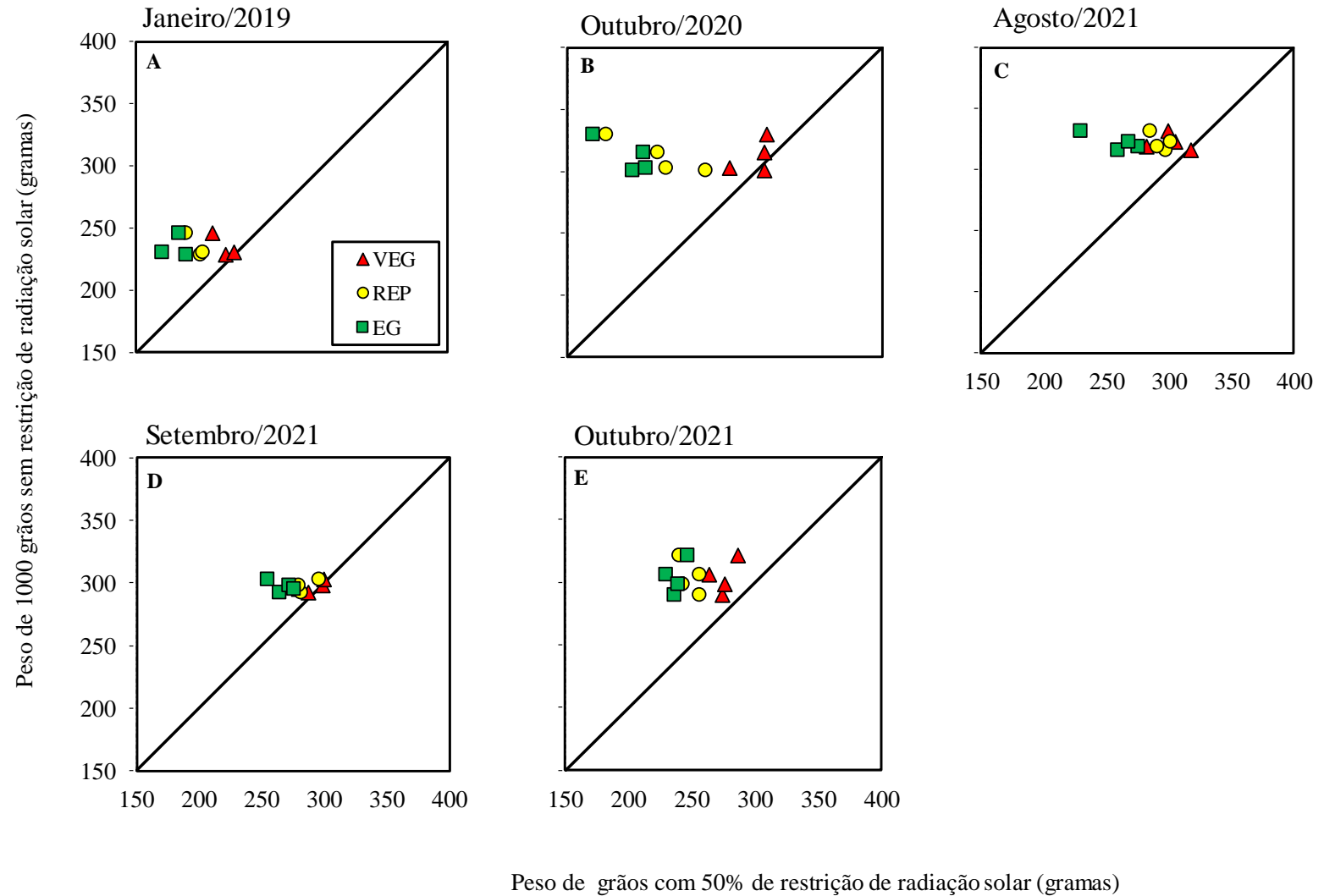
543





544

545 **Figura 4.** Produtividade de milho e Radiação Fotossinteticamente Ativa Total (RFAT) em milho sem sombreamento (test), sombreamento entre VE-Vn
 546 (Vegetativo), VT-R2 (Reprodutivo) e R3-R6 (Enchimento de Grãos).



547

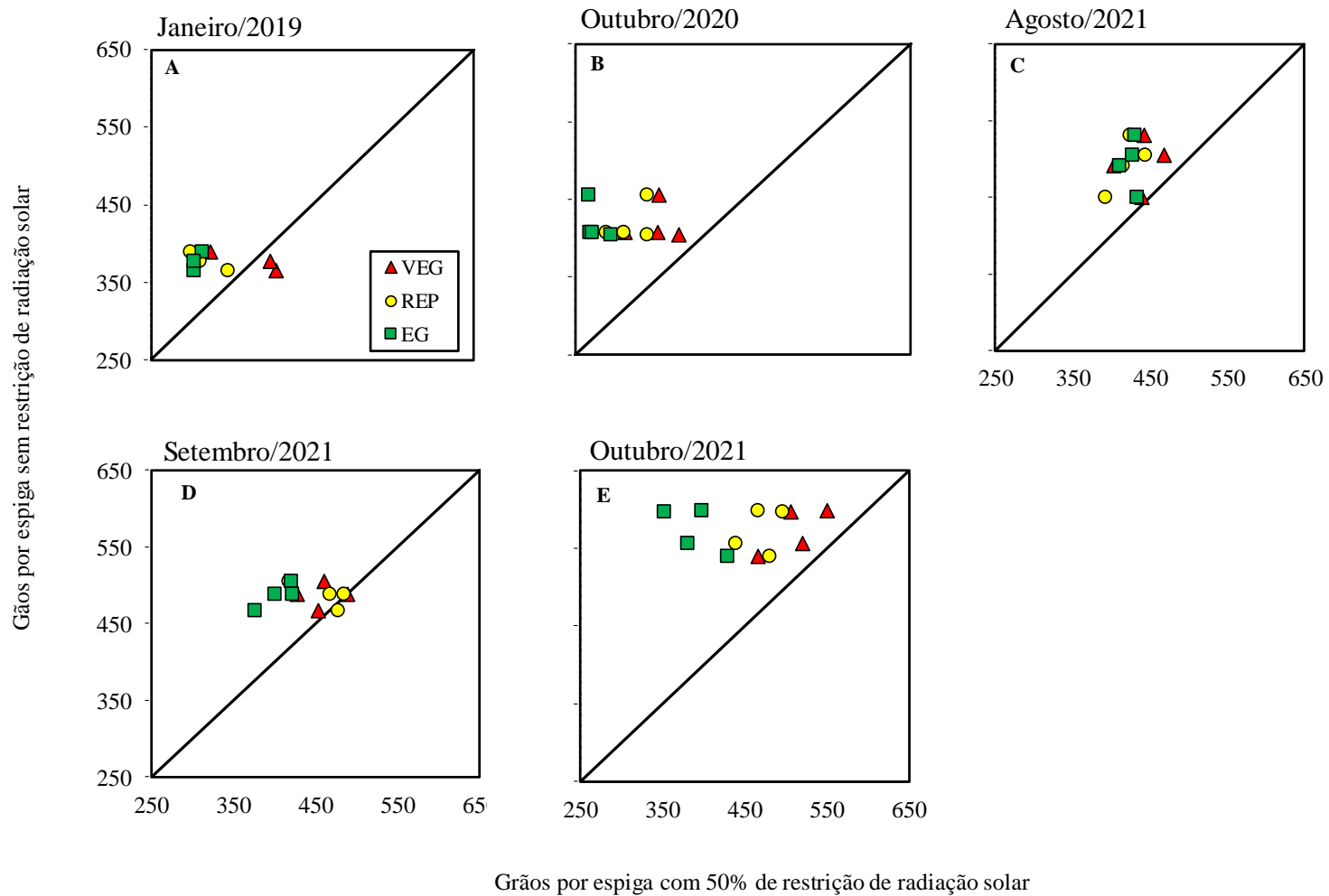
548 **Figura 5.** Comparação do peso de 1000 grãos (em gramas) entre os tratamentos com restrição de radiação incidente durante as estações de crescimento

549 2019/2019 em Agudo (A), semeadura em outubro/2020 (B), semeadura em agosto/2021 (C), semeadura em setembro/2021(D), e semeadura em

550 outubro/2021 (E) em Santa Maria. Cada gráfico representa a combinação data de semeadura × peso de 1000 grãos em ambiente sombreado.

551 Sombreamento no vegetativo (símbolos vermelhos), reprodutivo (símbolos amarelos) e enchimento de grãos (símbolos verdes). A linha diagonal sólida

552 em cada gráfico indica a hipótese nula

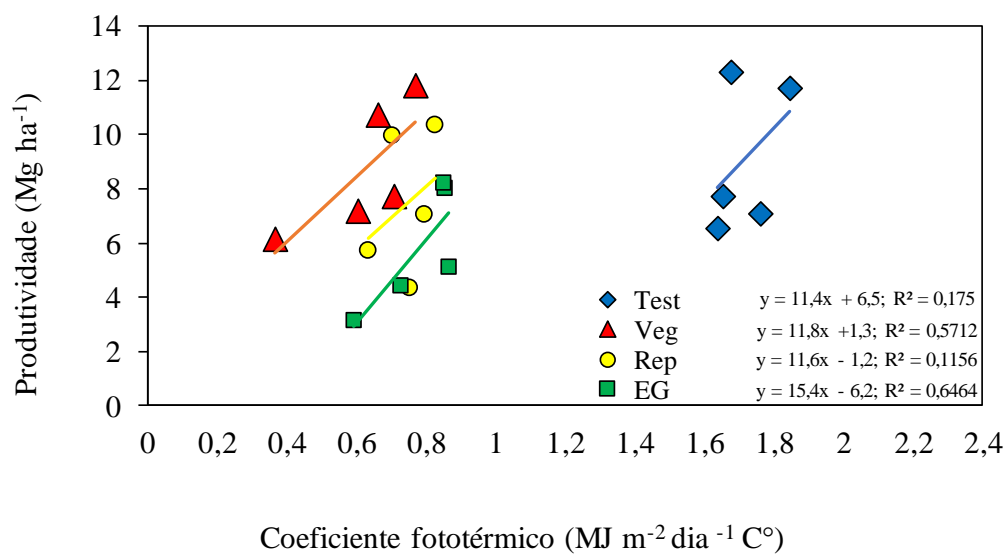


553

554 **Figura 6.** Comparação do número de grãos por espiga entre tratamentos com restrição de radiação durante as estações de crescimento 2019/2019 em
 555 Agudo (A), semeadura em outubro/2020 (B), semeadura em agosto/2021 (C), semeadura em setembro/2021(D), e semeadura em outubro/2021 (E) em
 556 Santa Maria. Cada ambiente representa a combinação data de semeadura × número de grãos por espiga em ambiente sombreado. Sombreamento em

557 vegetativo (símbolos vermelhos), reprodutivo (símbolos amarelos) e enchimento de grãos (símbolos verdes). A linha diagonal sólida em cada gráfico

558 indica a hipótese nula.



560

561

562 **Figura 7.** Regressões lineares entre Produtividade e Coeficiente Fototérmico por fase de
 563 desenvolvimento da cultura durante as estações de crescimento 2019/19, 2020/21 e 2021/22 em
 564 ambiente subtropical. O $p < 0,01$ indica significância a 1% de probabilidade de erro.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo irá contribuir para comunidade científica, produtores, técnicos e extensionistas da cultura do milho, a melhorar a compreensão da relação entre a radiação solar e a produtividade do milho em um dos maiores ambientes de produção do mundo. Quantificar a perda de produtividade em dias nublados e determinar como a limitação da radiação solar afeta os componentes do rendimento da cultura é importante para ajudar os produtores de milho a ajustar as datas de semeadura e direcionar os programas de melhoramento de milho para o desenvolvimento de variedades que são mais eficazes na utilização da radiação solar e na tolerância à restrição da mesma, destacando a importância do monitoramento das previsões climáticas quanto à probabilidade de eventos de El Niño.

5. REFERÊNCIAS

ABENDROTH, Lori Jean et al. Corn growth and development. **Ames, Iowa: Iowa State University Extension**, 49 p, 2011.

ANDRADE, Fernando Henrique et al. Kernel Number determination in maize. **Crop Science**, v.39, p. 453-459, 1999.

ANDREA, Maria Carolina da S. et al. Variability and limitations of maize production in Brazil: Potential yield, water-limited yield and yield gaps. **Agricultural Systems**, v. 165, n. July, p. 264–273, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.07.004>

ARAMBURU MERLOS, Fernando et al. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. **Field Crops Research**, v. 184, p. 145–154, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.001>

ARSEGO, Diogo Alessandro et al. Estudo do impacto de diferentes índices associados ao El Niño oscilação sul na produtividade de soja no Rio Grande do Sul. **Ciência e Natura**, v. 40, n. December, p. 82, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460x30684>

BENDER, Fabiani Denise; SENTELHAS, Paulo Cesar. Solar radiation models and gridded databases to fill gaps in weather series and to project climate change in Brazil. **Advances in Meteorology**, v. 2018, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/6204382>

BERLATO, Moacir Antonio; FARENZENA, Homero; FONTANA, Denise Cybis. Association between El Niño Southern Oscillation and corn yield in Rio Grande do Sul State. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 40, n. 5, p. 423–432, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2005000500001>

CASSMAN, Kenneth G. et al. M Eeting C Ereal D Emand W Hile P Rotecting N Atural R Esources and I Mproving E NvIRONMENTAL Q Uality . **Annual Review of Environment and Resource**, v. 28, n. 1, p. 315–358, 2003. Disponível em:

<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.040202.122858>

CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, Brasília, DF, v. 10, safra 2022/23, n. 12 **décimo segundo levantamento, setembro**. 2023a.

CONAB. Série histórica das safras: milho. 2023b. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/infoagro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 23 jul. 2023.

DE LA CASA, Antonio C.; OVANDO, Gustavo G.; DÍAZ, Guillermo J. ENSO influence on corn and soybean yields as a base of an early warning system for agriculture in Córdoba, Argentina. **European Journal of Agronomy**, v. 129, n. September 2020, p. 126340, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126340>

DE LA CASA, Antonio C.; OVANDO, Gustavo G.; DÍAZ, Guillermo J. Interannual variability of seasonal rainfall in Cordoba, Argentina, evaluated from ENSO and ENSO Modoki signals and verified with MODIS NDVI data. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 12, p. 1–21, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1650-6>

DIDONET, Agostinho Dirceu et al. Efeito da radiação solar e temperatura na definição do número de grãos em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 7, p. 933–938, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2002000700006>

DUARTE, Ary Jose et al. Rice yield potential as a function of sowing date in southern Brazil. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 2, p. 1523–1534, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agj2.20610>

FAO. 122 million more people pushed into hunger since 2019 due to multiple crises, reveals UN report. **Food and Agriculture Organization of the United Nations 2023**. Disponível em: <https://www.fao.org/newsroom/detail/122-million-more-people-pushed-into-hunger-since-2019-due-to-multiple-crises--reveals-un-report/en>. Acesso em: 20 de outubro de 2023.

FENG, Ying et al. Effects of solar radiation on photosynthetic physiology of barren stalk differentiation in maize. **Plant Science**, v. 312, n. August, p. 111046, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.111046>

GRASSINI, Patricio; CASSMAN, Kenneth G; ITTERSUM, M van. Exploring maize intensification with the Global Yield Gap Atlas. **Better Crops with Plant Food**, v. 101, n. 2, p. 7–9, 2017. Disponível em: [http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/0/619D40B5E8D4C2D585258124006AFEE2/\\$FILE/BC-2017-2.pdf](http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/0/619D40B5E8D4C2D585258124006AFEE2/$FILE/BC-2017-2.pdf)
<http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=caba6&AN=20173200239> <http://oxfordsfx.hosted.exlibrisgroup.com/oxford?sid=OVID:caba>

HAMMAD, Hafiz Mohkum et al. The effect of nutrients shortage on plant's efficiency to capture solar radiations under semi-arid environments. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 20, p. 20497–20505, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7206-z>

HOU, Peng et al. How to increase maize production without extra nitrogen input. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 160, n. December 2019, p. 104913, 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104913>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2023. Disponível em: sidra.ibge.gov.br
Acesso em: 08 de fevereiro de 2023.

KANNIAH, Kasturi Devi et al. Control of atmospheric particles on diffuse radiation and terrestrial plant productivity: A review. **Progress in Physical Geography**, v. 36, n. 2, p. 209-237, 2012. doi: 10.1177/0309133311434244

KOMATSU, Glaucia Samira Napy et al. Energia metabolizável para frangos das frações de milho de alta e baixa densidade segregadas em tabela densimétrica. **Revista Brasileira de Avicultura**, v. 21, 2019.

LICKER, Rachel et al. Mind the gap: How do climate and agricultural management explain the “yield gap” of croplands around the world? **Global Ecology and Biogeography**, v. 19, n. 6, p. 769–782, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00563.x>

LIU, Song et al. Understanding of Aerosol–Climate Interactions in China: Aerosol Impacts on Solar Radiation, Temperature, Cloud, and Precipitation and Its Changes Under Future Climate and Emission Scenarios. **Current Pollution Reports**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40726-019-00107-6>

LIU, Zhijuan et al. Maize potential yields and yield gaps in the changing climate of northeast China. **Global Change Biology**, v. 18, n. 11, p. 3441–3454, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02774.x>

LIU, G. et al. Canopy characteristics of high-yield maize with yield potential of 22.5 Mg ha⁻¹. **Field Crops Research**, v. 213, p. 221–230, 2017.

LOBELL, David B.; CASSMAN, Kenneth G.; FIELD, Christopher B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 34, n. 1, p. 179–204, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.environ.041008.093740>

MÜLLER, A. G. et al. Eficiências de interceptação, absorção e de uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas. In: **Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, 12.; reunião latinoamericana de agrometeorologia, 3., 2001. fortaleza, anais.... fortaleza: sociedade brasileira de agrometeorologia, p. 565-566, 2001.

NÓIA JÚNIOR, Rogério de Souza et al. Effects of the El Niño Southern Oscillation phenomenon and sowing dates on soybean yield and on the occurrence of extreme weather events in southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 290, n. November 2019, p. 108038, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108038>

NÓIA JÚNIOR, Rogério de Souza; SENTELHAS, Paulo Cesar. Soybean-maize succession in Brazil: Impacts of sowing dates on climate variability, yields and economic profitability. **European Journal of Agronomy**, v. 103, n. August 2018, p. 140–151, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.12.008>

ONU, United nations, department of economic and social affairs The United Nations,

Population Division, **Population Estimates and Projections Section**, 2012.

PENALBA, Olga Clorinda; RIVERA, Juan Antonio. Precipitation response to El Niño/La Niña events in Southern South America - Emphasis in regional drought occurrences. **Advances in Geosciences**, v. 42, n. 2005, p. 1–14, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/adgeo-42-1-2016>

PENGELLY, Jasper J.L. et al. Growth of the C4 dicot *Flaveria bidentis*: Photosynthetic acclimation to low light through shifts in leaf anatomy and biochemistry. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 14, p. 4109–4122, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erq226>

PU, Luoman et al. Spatio-temporal dynamics of maize potential yield and yield gaps in northeast China from 1990 to 2015. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 7, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph16071211>

RIBEIRO, B. S. M. R. et al. **Ecofisiologia do milho visando altas produtividades**. Santa Maria, RS: Palloti/SM, 2020. 230 p.

SAH, R. P. et al. Impact of water deficit stress in maize: Phenology and yield components. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–15, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59689-7>

SANGOI, Luis et al. **Ecofisiologia da cultura do milho para altos rendimentos**. Lages, SC: Graphel, 52 p., 2010.

SENAPATI, Nimai; SEMENOV, Mikhail A. Large genetic yield potential and genetic yield gap estimated for wheat in Europe. **Global Food Security**, v. 24, n. September 2019, p. 100340, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100340>

STANHILL, Gerald; COHEN, Shabtai. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 107, n. 4, p. 255–278, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00241-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00241-0)

TAIZ, Lincon et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. v. 6 ed.

VAN ITTERSUM, Martin K. et al. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4–17, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>

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

XU, Wenjuan et al. Adjusting maize plant density to different climatic conditions across a large longitudinal distance in China. **Field Crops Research**, v. 212, n. May, p. 126–134, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.006>

YANG, Peng Yu et al. Spatiotemporal variation of heat and solar resources and its impact on summer maize in the north China plain over the period 1961–2015. **Chinese Journal**

of **Agrometeorology**, v. 39, n. 7, p. 431–441, 2018. Disponível em:
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6362.2018.07.001>

YANG, Yun shan et al. The effect of solar radiation change on the maize yield gap from the perspectives of dry matter accumulation and distribution. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 20, n. 2, p. 482–493, 2021. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63581-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63581-X)

ZHAO, Yi et al. Using satellite remote sensing to understand maize yield gaps in the North China Plain. **Field Crops Research**, v. 183, p. 31–42, 2015. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.004>

ZHONG, X. M. et al. Photosynthesis and chlorophyll fluorescence of infertile and fertile stalks of paired near-isogenic lines in maize (*Zea mays* L.) under shade conditions. **Photosynthetica**, v. 52, n. 4, p. 597–603, 2014. Disponível em:
<https://doi.org/10.1007/s11099-014-0071-4>