

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

Eduardo Daniel Friedrich

**DENSIDADE AGRONÔMICA ÓTIMA DE MILHO EM AMBIENTES DE
PRODUÇÃO**

Santa Maria, RS
2021

Eduardo Daniel Friedrich

**DENSIDADE AGRONÔMICA ÓTIMA DE MILHO EM AMBIENTES DE
PRODUÇÃO**

Dissertação 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 título de **Mestre em Agronomia**.

Orientador: Prof. Dr. Alencar Junior Zanon
Co-orientador: Prof. PhD. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS
2021

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

Friedrich, Eduardo Daniel
Densidade Agronômica Ótima de Milho em Ambientes de
Produção / Eduardo Daniel Friedrich.- 2021.
57 p.; 30 cm

Orientador: Alencar Junior Zanon
Coorientador: Nereu Augusto Streck
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Agronomia, RS, 2021

1. Zea mays L. 2. arranjo de plantas 3. potencial de
produtividade 4. modelos baseados em processos 5.
componentes de rendimento I. Zanon, Alencar Junior II.
Streck, Nereu Augusto 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.

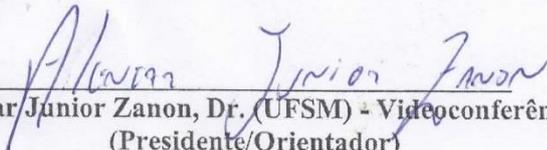
Declaro, EDUARDO DANIEL FRIEDRICH, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, 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.

Eduardo Daniel Friedrich

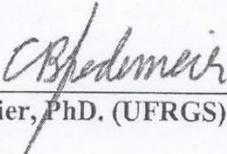
**DENSIDADE AGRONÔMICA ÓTIMA DE MILHO EM AMBIENTES DE
PRODUÇÃO**

Dissertação 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 título de **Mestre em Agronomia**.

Aprovado em 18 de fevereiro de 2021:


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


Diego Nicolau Follmann, Dr. (UFSM) - Videoconferência


Christian Bredemeier, PhD. (UFRGS) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2021

DEDICATÓRIA

À minha família, por todo amor e companheirismo que fizeram eu me tornar o que hoje sou.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

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

Aos meus pais Evandro e Ani Friedrich, por toda ajuda e companheirismo, além da ajuda no monitoramento do experimento em sua propriedade.

À minha avó Vali e meu irmão César, pela alegria e por todo carinho recebido.

À minha namorada, Farmacêutica e Mestre em Farmacologia Patrícia Rodrigues, pelo companheirismo, amor e ajuda, na qual me inspiro e por estar ao meu lado nessa jornada e me ajudar cada vez mais a ir em busca de meus objetivos.

Ao meu orientador Alencar Junior Zanon e co-orientador Nereu Augusto Streck, por me guiarem na pesquisa, pelos conselhos e acreditarem em meu trabalho.

À Equipe FieldCrops, por me proporcionar alguns dos melhores momentos da minha vida, por toda parceria e experiência adquirida neste período, assim como, contribuiu enormemente para 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.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos.

À minha amiga e colega Eng. Agrônoma Bruna San Martin Rolim Ribeiro, por toda ajuda, parceria e ensinamentos durante o período de mestrado.

Ao meu amigo Luíz Felipe Vieira Sarmento, pela dedicação e ajuda na condução dos experimentos e pela amizade.

À equipe milho, por não medirem esforços na condução dos experimentos, pela ajuda em viagens, por toda parceria na condução dos experimentos e nas atividades da equipe.

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

Aos meus amigos da sala 2, minha eterna gratidão pela ajuda, parceria, risadas e festas, vocês serão eternamente lembrados por mim.

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

MUITO OBRIGADO!

Epígrafe

“Eu sou parte de uma equipe. Então, quando venço, não sou eu apenas quem vence. De certa forma, termino o trabalho de um grupo enorme de pessoas.” – (Ayrton Senna).

RESUMO

DENSIDADE AGRONÔMICA ÓTIMA DE MILHO EM AMBIENTES DE PRODUÇÃO

AUTOR: Eduardo Daniel Friedrich

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alencar Junior Zanon

CO-ORIENTADOR: Prof. PhD. Nereu Augusto Streck

Para suprir a demanda de milho até o ano de 2050 é necessário aumentar 100% da produção no mundo. Neste sentido, o aumento da densidade de plantas foi um dos principais fatores que promoveram o incremento de produtividade a nível de lavoura nos últimos 40 anos. De 1980 até 2016, ocorreu um aumento da densidade de 24% e permitiu um aumento médio de 3 Mg.ha⁻¹. O objetivo deste estudo foi determinar a densidade agronômica ótima em ambientes de produção. Os ambientes de produção foram classificados como de baixa (< 10 Mg.ha⁻¹, Agudo), média (10 e 16 Mg.ha⁻¹, Entre-Ijuís e Jóia), e alta (> 16 Mg.ha⁻¹, Júlio de Castilhos) produtividade. Foram conduzidos experimentos nesses ambientes de produção, localizados no estado do Rio Grande do Sul (RS), sul do Brasil, com densidades variando de 60 a 140 mil pl.ha⁻¹. As densidades de semeadura que proporcionaram as maiores produtividades, foram 116,2 mil pl.ha⁻¹ e 60 mil pl.ha⁻¹ no ambiente de alta e baixa produtividade, respectivamente. O aumento da densidade provocou incrementos de produtividade no ambiente de alta e redução no ambiente de baixa produtividade. O número de grãos por fileira, foi o componente de produtividade mais sensível a variações na densidade para os três ambientes de produção. A densidade de 120 mil pl.ha⁻¹ proporcionou a maior eficiência na conversão de radiação fotossinteticamente ativa interceptada em grãos (22,6 kg.ha⁻¹ por MJ.m⁻²), por outro lado, a densidade de 100 mil pl.ha⁻¹ interceptou a maior quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (89%). Com o ajuste da densidade agronômica ótima por ambiente de produção é possível aumentar a eficiência do uso de recursos, sobretudo em ambientes de produção com produtividades superiores a 16 Mg.ha⁻¹.

Palavras-chave: *Zea mays* L. arranjo de plantas. potencial de produtividade. modelos baseados em processos. componentes de rendimento.

ABSTRACT

MAIZE AGRONOMIC OPTIMUM DENSITY IN YIELD ENVIRONMENTS

AUTHOR: Eduardo Daniel Friedrich

ORIENTER: Prof. Dr. Alencar Junior Zanon

CO-ORIENTER: Prof. PhD. Nereu Augusto Streck

To supply the demand for corn by the year 2050, it is necessary to increase 100% of production in the world. The increase in plant density was one of the main factors that promoted the increase in yield at the level of crops in the last 40 years. From 1980 to 2016, there was an increase in density of 24 % and allowed an average increase of 3 Mg.ha⁻¹. The objective of this study was to determine the optimal agronomic density in production environments. The production environments were classified as low (<10 Mg.ha⁻¹; Agudo), medium (10 and 16 Mg.ha⁻¹; Entre-Ijuís and Jóia), and high (> 16 Mg.ha⁻¹; Júlio de Castilhos) yield. Experiments were conducted in these production environments, located in the state of Rio Grande do Sul (RS), southern Brazil, with densities ranging from 60 to 140 thousand pl.ha⁻¹. The sowing densities that provided the highest yields were 116.2 thousand pl.ha⁻¹ and 60 thousand pl.ha⁻¹ in the high and low yield environment, respectively. The density increase caused increases in yield in the high environment and reduction in the low yield environment. The number of grains per row was the yield component most sensitive to variations in density for the three environments. The density of 120 thousand pl.ha⁻¹ provided the greatest efficiency in the photosynthetically active radiation intercepted conversion in grains (22.6 kg.ha⁻¹ per MJ.m⁻²), on the other hand, the density of 100 thousand pl.ha⁻¹ intercepted the largest amount of photosynthetically active radiation (89%). Therefore, these results are of great importance in increasing in the resources use efficiency by adjusting the agronomic optimal density, especially in production environments with yields greater than 16 Mg.ha⁻¹.

Keywords: *Zea mays* L.. plants arrangement. yield potential. process-based models. yield components.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1** - Produtividade média de milho dos últimos 5 anos (2015-2019) no estado do Rio Grande do Sul e a localização das áreas experimentais (círculos vermelhos). Os experimentos foram conduzidos durante duas safras em Júlio de Castilhos (2018/2019 e 2019/2020) e na safra de 2019/2020 em Agudo, Jóia e Entre-Ijuís no Rio Grande do Sul, Brasil.....25
- Figura 2** - Produtividade de (15,5 % de umidade) *versus* a densidade de plantas em dois ambientes de produção, sendo o ambiente de AP (linhas verdes) e o ambiente de BP (linhas vermelhas), semeados na safra 2018-2019 (linha tracejada) e na safra 2019-2020 (linha contínua). O quadrado azul representa o híbrido AG9025, o triângulo vermelho o P1630, o losango verde o P30F53. As equações estão descritas na tabela 2.32
- Figura 3** – Relação entre a simulação do potencial de produtividade a partir do modelo “Hybrid-Maize” (Simulado) e observado na densidade agrônômica ótima nos experimentos (Observado), para os ambientes de produção a 15,5% de umidade. As siglas JC (Júlio de Castilhos), JO (Jóia), EI (Entre-Ijuís) e AG (Agudo) representam os ambientes de produção, sendo considerado de alta produtividade o JC 18/19 e JC 19/20, média produtividade JO e EI e baixa produtividade AG. São mostrados a raiz quadrada média do erro (RMSE) e o erro quadrado médio normalizado (RMSEn, %). Barras de erro representam o erro padrão. ..34
- Figura 4** - Relação dos componentes de rendimento e a densidade, em ambiente de alta produtividade (AP, círculo verde) e baixa produtividade (BP, quadrado vermelho). O painel mostra a resposta do número de fileiras por espiga em (A), altura de planta em (B), grãos por fileira em (C), altura de espiga em (D), peso de 1000 grãos em (E) e o diâmetro do colmo em (F).37
- Figura 5**– Função limite para determinar a relação dos componentes de rendimento do milho e a produtividade de grãos a 15,5% de umidade em ambientes de alta produtividade de grãos (AP, círculo verde), média produtividade de grãos (MP, triângulo amarelo) e baixa produtividade de grãos (BP, quadrado vermelho). O painel mostra a resposta do número de fileiras por espiga em (A), altura de planta em (B), grãos por fileira em (C), altura de espiga em (D), peso de 1000 grãos em (E) e diâmetro de colmo em (F).39
- Figura 6** – Radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada, acumulada e assimilada referente as quatro densidades de plantas de milho para o híbrido AG 9025 em Júlio de Castilhos, um ambiente de alta produtividade, semeado na safra 2019/2020.....43
- Figura 7** – Eficiência da interceptação da radiação fotossinteticamente ativa em relação aos dias após a semeadura, para densidades de 60, 80, 100 e 120 mil pl.ha⁻¹, em Júlio de Castilhos semeado na safra 2019/2020.44
- Figura 8** – Imagens do terço inferior das plantas de milho no estágio R3, demonstrando o efeito da densidade de plantas na senescência foliar. Representando as densidades de 60 mil pl.ha⁻¹ (A), 80 mil pl.ha⁻¹ (B), 100 mil pl.ha⁻¹ (C) e 120 mil pl.ha⁻¹ (D), do híbrido AG 9025 na safra 2019/2020 no município de Júlio de Castilhos, RS. Fonte: Autor e Victória Brittes Inklman.45

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Caracterização das áreas experimentais, bem como os híbridos utilizados com sua maturidade até a maturidade fisiológica e respectivas densidades e época de semeadura em 2018/2019 e 2019/2020 em quatro locais no Rio Grande do Sul. .26
- Tabela 2** - Representação das combinações dos híbridos de milho (Figura 1) e ambientes de produção, sendo a linha verde o ambiente de alta produtividade e a linha vermelha no ambiente de baixa produtividade, semeados na safra 2018-2019 (linha tracejada) e na safra 2019-2020 (linha contínua) e as respectivas equações, coeficiente de determinação (R^2), p-valor (95%) e 95% de intervalo de confiança (95% IC) para densidades menor e maior da densidade agrônômica ótima (DAO), bem como, para potencial de produtividade a 15,5% de umidade da DAO..... 33
- Tabela 3** - Correlação de Pearson para ambientes de alta, média e baixa produtividade entre diâmetro de colmo (DC), altura de planta (AP), altura de espiga (AE), espigas por planta (EP), número de fileiras por espiga (FE), número de grãos por fileira (GF), peso de mil grãos (PG), densidade de plantas (DP) e produtividade de grãos (PR).
..... 41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE.....	15
2.1.2 AMBIENTES DE PRODUÇÃO	16
2.1.3 DENSIDADE AGRONÔMICA ÓTIMA.....	17
3.ARTIGO - DENSIDADE AGRONÔMICA ÓTIMA DE MILHO EM AMBIENTES DE PRODUÇÃO	19
MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
Descrição dos experimentos	25
Simulações com o modelo Hybrid-Maize	27
Análises estatísticas.....	28
Determinação da radiação fotossinteticamente ativa.....	29
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
Relação entre produtividade e densidade de plantas em ambientes de produção.....	30
Correlações de Pearson entre componentes de rendimento, densidade e produtividade	40
Radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada e sua relação com a produtividade	42
CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

Suprir a demanda de alimentos é um dos principais desafios encontrados pela agricultura mundial em um cenário de rápido crescimento populacional, com disponibilidade limitada de terras agricultáveis (HERTEL, 2011). O aumento na eficiência no uso de recursos na agricultura, é fundamental para que haja sustentabilidade na intensificação da produção (MUELLER et al., 2012). Até o ano de 2050, é estimado que seja necessário um aumento de 100% da produção de milho (*Zea mays* L.) para atender a demanda mundial (TILMAN et al., 2011), uma vez que é a principal cultura de grão produzida, em virtude de seus usos, na alimentação humana, animal e produção de biocombustíveis (CASSMAN et al., 2003).

O aumento da produtividade das lavouras de milho nos últimos 50 anos deve-se a melhorias em práticas de manejo, como o aumento da densidade de plantas e o melhoramento genético (TOLLENAAR; LEE, 2002), tornando as plantas de milho mais tolerantes aos estresses causados pela competição entre plantas em altas densidades (VALENTINUZ; TOLLENAAR, 2004). Segundo Assefa et al., (2018a), nos Estados Unidos houve um incremento médio na produtividade de aproximadamente 3 Mg ha⁻¹, devido ao aumento de 24 % na densidade de plantas em 36 anos (1980 até 2016).

Assim, em híbridos modernos, a densidade de plantas é considerado um dos manejos de maior importância para obtenção de altas produtividades de milho, pelo fato de produzir em média apenas uma espiga por planta (TOKATLIDIS, 2013). As limitações impostas pelo ambiente de produção e a quantidade de recursos disponíveis, determinam a densidade de plantas que proporciona a maior produtividade, denominada de densidade agrônômica ótima (DAO) (ASSEFA et al., 2016; XU et al., 2017). Estudos com essa abordagem já foram realizados em soja (CARCIOCHI et al., 2019; PEDERSEN ;LAUER, 2002) e trigo (FISCHER, et al., 2019). Em milho, estudos buscando determinar a DAO (ASSEFA et al., 2018a) foram realizados nos Estados Unidos tiveram as produtividades máximas de 14 Mg.ha⁻¹. Demonstrando assim uma lacuna no conhecimento sobre a DAO para atingir o potencial de produtividade próximo a 20 Mg.ha⁻¹ alcançados nas lavouras de milho no Brasil (RIBEIRO et al., 2020). Para isto, torna-se necessário definir a DAO para os principais ambientes de produção do sul do Brasil, de acordo com os recursos disponíveis em cada ambiente e sistema de produção. Assim como, verificar a DAO para ambientes com produtividades superiores a 16 Mg ha⁻¹, visto que, informações com esse tema não estão disponíveis em patamares tão elevados de produtividade. Logo, através deste trabalho espera-se aprimorar as recomendações de manejo, sobre densidades de plantas de milho em função do ambiente de produção, além de

apresentar a DAO para ambientes com produtividades superiores 16 Mg ha^{-1} . Dessa forma, a eficiência no uso de recursos e a sustentabilidade produtiva da lavoura de milho será aumentada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE

O termo potencial de produtividade (PP), é a definição da produtividade que uma cultura atinge em um ambiente na qual é adaptada, sem a limitação de água e nutrientes, e sem a interferência de pragas, doenças, plantas daninhas ou outros estresses (EVANS, 1993; VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997). Desta forma, a produtividade é definida pela radiação solar, características genéticas, CO₂ e temperatura (EVANS, 1993; VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997). O PP é restrito ao local e ano, devido à variabilidade no clima (VAN ITTERSUM et al., 2013). Para estimar o PP da cultura em determinado local, sob práticas de manejo específicas, podem ser realizados experimentos de campo ou concursos de produtividade, desde que, os fatores limitantes de produtividade sejam bem controlados, sendo necessária uma replicação por muitos anos para ter robustez na PP média e representar suas variações (CASSMAN et al., 2003). Quando utilizado o método de concursos de produtividade, devem ser utilizadas datas de semeaduras e ciclo de cultivares que sejam representativas para a região (CASSMAN et al., 2003). Porém, esse método possui limitações em relação a dificuldade de controlar todos os estresses, mantendo o controle ao longo dos anos (CASSMAN et al., 2003).

Não apresentando essas dificuldades anteriormente mencionadas, o PP pode ser estimado por modelos de simulação da cultura, a partir das interações entre o manejo, a genética e o ambiente. Sendo necessário fornecer dados meteorológicos, de manejo (densidade de semeadura, ciclo do híbrido, nome comercial da empresa, data de semeadura e a dose aplicada de nitrogênio) e de solo (profundidade explorável pelas raízes, textura do solo, porcentagem de solo coberto com resíduos, umidade do solo no momento da semeadura, densidade do solo e a estimativa do escoamento superficial de água) no momento da semeadura (VAN ITTERSUM et al., 2013). Neste contexto, o Hybrid Maize é um modelo que simula o crescimento e desenvolvimento do milho, sem a limitação de recursos em ambientes irrigado ou sequeiro, baseando-se nos dados meteorológicos ao longo do ciclo de desenvolvimento. Este modelo foi desenvolvido com o objetivo de prever a produtividade de grãos, baseando-se na radiação solar, fenologia, temperatura e arquitetura do dossel (densidade e área foliar) (YANG et al., 2004). Desta forma, possibilita estimar a produtividade potencial com base em um histórico de dados meteorológicos (temperatura mínima e máxima do ar, radiação solar, precipitação, umidade relativa e evapotranspiração), dados de solo e coeficientes genéticos (soma térmica e eficiência de uso da radiação solar). Portanto, o Hybrid Maize é capaz de simular o crescimento e

desenvolvimento das plantas de milho, e possibilita ainda visualizar a alteração da produtividade potencial com a modificação da data de semeadura, o ciclo da cultivar e a densidade de plantas, estimar o momento ideal e a lâmina a ser irrigada. Assim como, a eficiência do uso da água da irrigação e também, faz previsões da produtividade com base nos dados meteorológicos até a data atual, associados aos dados meteorológicos históricos para o restante da ciclo de cultivo (YANG et al., 2017).

A lacuna de produtividade (LP), é definida como a diferença entre o PP e a produtividade atingida em lavouras (VAN ITTERSUM et al., 2013). Assim, o PP pode ser mensurado para talhões de lavouras em um determinado ano, ou em áreas ou regiões maiores e por um período maior, levando em conta sua variação espacial e temporal (EWERT et al., 2011).

2.1.2 AMBIENTES DE PRODUÇÃO

Os ambientes de produção variam conforme a sua localização geográfica, características do solo, preferências do consumidor e do produtor, uso de insumos e a acessibilidade, e muitas vezes, os limites dos ambientes de produção são definidos por pesquisadores como a área onde uma determinada tecnologia pode ser utilizada (HARTKAMP et al., 2000). O uso de modelos de simulação de culturas, permite explorar a interação existente entre o ambiente e a cultura, como em casos onde se quer avaliar resposta entre o manejo e a condição hídrica (LÖFFLER et al., 2005).

A classificação quanto aos ambientes de produção para milho (ASSEFA et al., 2018a; ASSEFA et al., 2016; SCHWALBERT et al., 2018), canola (ASSEFA et al., 2018b) e soja (CARCIOCHI et al., 2019; CORASSA et al., 2018) pode ser realizada com base na sua produtividade média, podendo haver alterações de determinado local quanto a sua classificação, dependendo da produtividade de cada ano. No cinturão do milho dos EUA, Balboa, et al., (2019) classificaram os ambientes através de níveis de manejo em sistemas de rotação soja-milho, visando identificar os fatores de manejo que contribuem para o aumento da produtividade e que caracterizem os ambientes de produção, como a densidade de plantas, o espaçamento entre linhas, a adubação e o controle fitossanitário de doenças e insetos.

Ribeiro et al., (2020), abordaram o tema de ambientes de produção para classificar o Rio Grande do Sul em três ambientes, baseando-se em diferenças no manejo, no potencial e lacuna de produtividade e na localização geográfica. Dentre os fatores de manejo, é destacada a diferença entre ciclos dos híbridos, época de semeadura, densidade de plantas e espaçamento

entre linhas, adubação, rotação de culturas e manejo fitossanitário. Sendo constatado as menores lacunas de produtividade, nos ambientes que antecipam a semeadura utilizando menores espaçamentos entre linha, maior densidade de semeadura e híbridos com ciclo menor, em que os produtores realizam rotação de culturas com investimento em adubações mais elevadas e com manejo fitossanitário com mais aplicações.

2.1.3 DENSIDADE AGRONÔMICA ÓTIMA

A densidade de plantas é um dos principais fatores que promovem a lacuna de produtividade em lavouras de milho, em função do ajuste inadequado entre a demanda das plantas e os recursos disponíveis no ambiente de produção (RUFFO et al., 2015). Estudos buscando a DAO podem ser observados também em culturas como a soja nos Estados Unidos e Canadá, sendo encontrado uma DAO de 313 mil pl.ha⁻¹ para ambientes de baixa produtividade e uma DAO de 238 mil pl.ha⁻¹ para ambientes de média e alta produtividade (CARCIOCHI et al., 2019) e 518,5 mil pl.ha⁻¹ no estudo também realizado nos Estados Unidos (PEDERSEN; LAUER, 2002), em trigo (FISCHER et al., 2019) testando os resultados de experimentos de 30 anos as condições climáticas do México, não encontraram diferença na produtividade com variações na densidade de 80-400 pl.m⁻², em função da elevada capacidade compensatória através do perfilhamento.

A DAO juntamente com alterações no arranjo de plantas, afetam a estrutura do dossel e a senescência das folhas inferiores (velhas) (TETIO-KAGHO; GARDNER, 1988), sendo uma prática de manejo de grande importância, pois, influencia diretamente a interceptação da radiação solar, que é um dos fatores determinantes do potencial de produtividade (LOOMIS; AMTHOR, 1999), principalmente quando os outros fatores ambientais estão favoráveis (OTTMAN; WELCH, 1989). Portanto, o uso de densidades abaixo da DAO retardam o fechamento do dossel, ocorrendo a menor interceptação de radiação solar (WESTGATE et al., 1997). Já o uso de densidades acima da DAO, acarretam na maior competição intraespecífica, aumentando assim a variabilidade entre plantas e a esterilidade em função do menor direcionamento de fotoassimilados para a espiga, o que diminui a produtividade (ECHARTE et al., 2000; ECHARTE; ROTHSTEIN; TOLLENAAR, 2008).

Como a produtividade do milho é uma função dos componentes de rendimento, número de plantas por área, número de espigas por planta, número de grãos por espiga e peso de grãos (ASSEFA et al., 2018a), a DAO é um dos principais manejos, pois os híbridos modernos possuem apenas uma espiga por planta (TOKATLIDIS, 2013). O aumento da produtividade

ocasionada pelo aumento da densidade de plantas, é a principal mudança nos últimos 50 anos em híbridos de milho que é clara e capaz de ser quantificada (DUVICK, 2005). Os híbridos de milho apresentam variabilidade quanto à altura de plantas, número de folhas, área foliar, ângulo vertical das folhas e distribuição da área foliar ao longo do colmo (MADDONNI; OTEGUI, 1996). Desta forma, deve-se ajustar o arranjo de plantas de acordo com o ambiente, a estrutura do híbrido e a disponibilidade de recursos (ARGENTA; SILVA; SANGOI, 2001), pois os limites inferior e superior da DAO são determinados pelo potencial de produtividade da planta e pela tolerância à densidade (MYLONAS et al., 2020).

3. ARTIGO - DENSIDADE AGRONÔMICA ÓTIMA DE MILHO EM AMBIENTES DE PRODUÇÃO

(Será submetido para a revista Pesquisa Agropecuária Brasileira)

Densidade agronômica ótima de milho em ambientes de produção

Eduardo Daniel Friedrich⁽¹⁾, Bruna San Martin Rolim Ribeiro⁽¹⁾, Luiz Felipe Vieira Sarmiento⁽¹⁾, Simone Puntel⁽¹⁾, Ijésica Luana Streck⁽¹⁾, Victória Brittes Inklman⁽¹⁾, Nereu Augusto Streck⁽¹⁾, Mateus Possebon Bortoluzzi⁽²⁾, 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.

⁽²⁾ Universidade de Passo Fundo, Avenida Brasil Leste, nº 285, CEP 99052-900, Passo Fundo, RS, Brasil.

E-mail: friedricheduardo@hotmail.com, alencarzanon@hotmail.com, nstreck2@yahoo.com.

Abstract—To supply the demand for corn by the year 2050, it is necessary to increase 100% of production in the world. The increase in plant density was one of the main factors that promoted the increase in yield at the level of crops in the last 40 years. From 1980 to 2016, there was an increase in density of 24 % and allowed an average increase of 3 Mg.ha⁻¹. The objective of this study was to determine the optimal agronomic density in production environments. The production environments were classified as low (<10 Mg.ha⁻¹; Agudo), medium (10 and 16 Mg.ha⁻¹; Entre-Ijuís and Jóia), and high (> 16 Mg.ha⁻¹; Júlio de Castilhos) yield. Experiments were conducted in these production environments, located in the state of Rio Grande do Sul (RS), southern Brazil, with densities ranging from 60 to 140 thousand pl.ha⁻¹. The sowing densities that provided the highest yields were 116,2 thousand pl.ha⁻¹ and 60 thousand pl.ha⁻¹ in the high and low yield environment, respectively. The density increase caused increases in

26 yield in the high environment and reduction in the low yield environment. The number of grains
27 per row was the yield component most sensitive to variations in density for the three
28 environments. The density of 120 thousand pl.ha⁻¹ provided the greatest efficiency in the
29 photosynthetically active radiation intercepted conversion in grains (22.6 kg.ha⁻¹ per MJ.m⁻²),
30 on the other hand, the density of 100 thousand pl.ha⁻¹ intercepted the largest amount of
31 photosynthetically active radiation (89%). Therefore, these results are of great importance in
32 increasing in the resources use efficiency by adjusting the agronomic optimal density,
33 especially in production environments with yields greater than 16 Mg.ha⁻¹.

34

35 **Index terms:** *Zea mays* L., plants arrangement, yield potential, process-based models, yield
36 components.

37

Densidade agronômica ótima de milho em ambientes de produção

38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63

Resumo — Para suprir a demanda de milho até o ano de 2050, é necessário aumentar 100% da produção no mundo. Neste sentido, o aumento da densidade de plantas foi um dos principais fatores que promoveram o incremento de produtividade a nível de lavoura nos últimos 40 anos. De 1980 até 2016, ocorreu um aumento da densidade de 24% e permitiu um aumento médio de 3 Mg.ha⁻¹. O objetivo deste estudo foi determinar a densidade agronômica ótima em ambientes de produção. Os ambientes de produção foram classificados como de baixa (< 10 Mg.ha⁻¹, Agudo), média (10 e 16 Mg.ha⁻¹, Entre-Ijuís e Jóia), e alta (> 16 Mg.ha⁻¹, Júlio de Castilhos) produtividade. Foram conduzidos experimentos nesses ambientes de produção, localizados no estado do Rio Grande do Sul (RS), sul do Brasil, com densidades variando de 60 a 140 mil pl.ha⁻¹. As densidades de semeadura que proporcionaram as maiores produtividades, foram 116,2 mil pl.ha⁻¹ e 60 mil pl.ha⁻¹ no ambiente de alta e baixa produtividade, respectivamente. O aumento da densidade provocou incrementos de produtividade no ambiente de alta e redução no ambiente de baixa produtividade. O número de grãos por fileira, foi o componente de produtividade mais sensível a variações na densidade para os três ambientes. A densidade de 120 mil pl.ha⁻¹ proporcionou a maior eficiência na conversão de radiação fotossinteticamente ativa interceptada em grãos (22,6 kg.ha⁻¹ por MJ.m⁻²), por outro lado, a densidade de 100 mil pl.ha⁻¹ interceptou a maior quantidade de radiação fotosinteticamente ativa (89%). Portanto, esses resultados possuem grande importância no aumento da eficiência no uso de recursos com o ajuste da densidade agronômica ótima, sobretudo em ambientes de produção com produtividades superiores a 16 Mg.ha⁻¹.

Palavras-chave: *Zea mays* L., arranjo de plantas, potencial de produtividade, modelos baseados em processos, componentes de rendimento.

64 INTRODUÇÃO

65

66 O aumento da eficiência do uso de recursos na agricultura através da intensificação
67 sustentável é uma meta de pelo menos, dois dos dezessete objetivos de desenvolvimento
68 sustentável elencados pela ONU (Mueller et al., 2012; FAO, 2021). O milho (*Zea mays* L.) é a
69 principal cultura de grãos produzida no mundo, e além de ser a base alimentar de milhões de
70 pessoas, serve como matéria prima para a formulação de ração animal e produção de etanol
71 (Cassman et al., 2003). O cenário de aumento populacional é preocupante e para suprir a
72 demanda de milho até o ano de 2050, é necessário aumentar 100% da produção sem aumentar
73 a atual área agricultável (Tilman et al., 2011). Para isto, precisamos entender intimamente os
74 ambientes de produção em que o milho está inserido, a fim de maximizar a produção na área
75 existente, considerando as potencialidades e limitações de cada ambiente.

76 O aumento da produtividade na cultura do milho está fortemente relacionado ao
77 aumento da densidade de plantas (Tollenaar & Lee, 2002; Li et al., 2015). Desde a década de
78 1980 até 2016, o aumento de 24% na densidade de plantas permitiu um aumento médio de 3
79 Mg.ha⁻¹ nas lavouras de milho nos Estados Unidos (Assefa et al., 2018). A densidade que
80 proporciona a maior produtividade por ambiente de produção pode ser definida como densidade
81 agrônômica ótima (DAO) (Xu et al., 2017). Essa denominação também pode ser interpretada
82 como a menor quantidade de plantas necessária para maximizar a produtividade de grãos
83 (Carciochi, et al., 2019; Ferreira, et al., 2020). A DAO é atingida quando ocorre o equilíbrio
84 perfeito entre o decréscimo da produtividade individual e o aumento da produtividade da
85 comunidade de plantas (Schwalbert et al., 2018). Estudos buscando a DAO já foram realizados
86 em soja (Pedersen & Lauer, 2002; Carciochi et al., 2019) e trigo (Fischer et al., 2019). O último
87 estudo com esse foco foi realizado em lavouras de milho nos Estados Unidos e reportou
88 produtividades máximas de 14 Mg.ha⁻¹ na densidade de 93 mil pl.ha⁻¹ (Assefa et al., 2018), não

89 havendo nenhum estudo com o foco de classificar ambientes de produção no Brasil com
90 produtividades superiores a $16 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, sendo encontrado por Schwalbert et al., (2018), a
91 produtividade máxima de $15,3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ em uma densidade de 88 mil pl. $\cdot\text{ha}^{-1}$. Em função das
92 plantas de milho possuírem uma capacidade limitada de resposta das estruturas reprodutivas
93 aos recursos disponíveis no ambiente, esses estudos precisam ser realizados constantemente a
94 nível de lavoura de milho, visando aumentar a eficiência do uso de recursos (Edmeadest &
95 Daynard, 1979).

96 As condições ambientais ao decorrer do ciclo, são influenciadas principalmente pela
97 época de semeadura e localização geográfica, visto que, predefinem a temperatura e a
98 incidência de radiação solar (Cirilo & Andrade, 1994). Essas variáveis climáticas juntamente
99 com o potencial de produtividade, desempenham um papel fundamental na determinação da
100 DAO em milho, em função da disponibilidade e eficiência no uso dos recursos (Sangoi, 2001;
101 Schwalbert et al., 2018). A DAO associada ao arranjo de plantas, determinam a eficiência da
102 interceptação de radiação, pois o índice de área foliar (IAF) é diretamente influenciado
103 (Bergamaschi & Matzenauer, 2014). Sendo assim, é necessário definir DAO para os principais
104 ambientes de produção do Brasil, de acordo com os recursos disponíveis em cada ambiente e
105 sistema de produção, assim como, identificar a DAO para ambientes com produtividades
106 superiores a $16 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Os objetivos deste trabalho foram (a) determinar a densidade
107 agrônômica ótima em ambientes de produção, (b) definir quais os componentes de
108 produtividade possuem maior relação com a produtividade de grãos em cada ambiente de
109 produção e (c) determinar os valores ótimos de componentes de produtividade que permitem
110 alcançar altas produtividades. Para isso, foram conduzidos experimentos em lavouras que
111 representam ambientes de produção de alta, média e baixa produtividade, tendo potenciais de
112 produtividade e características socioeconômicas distintas.

113

114 MATERIAIS E MÉTODOS

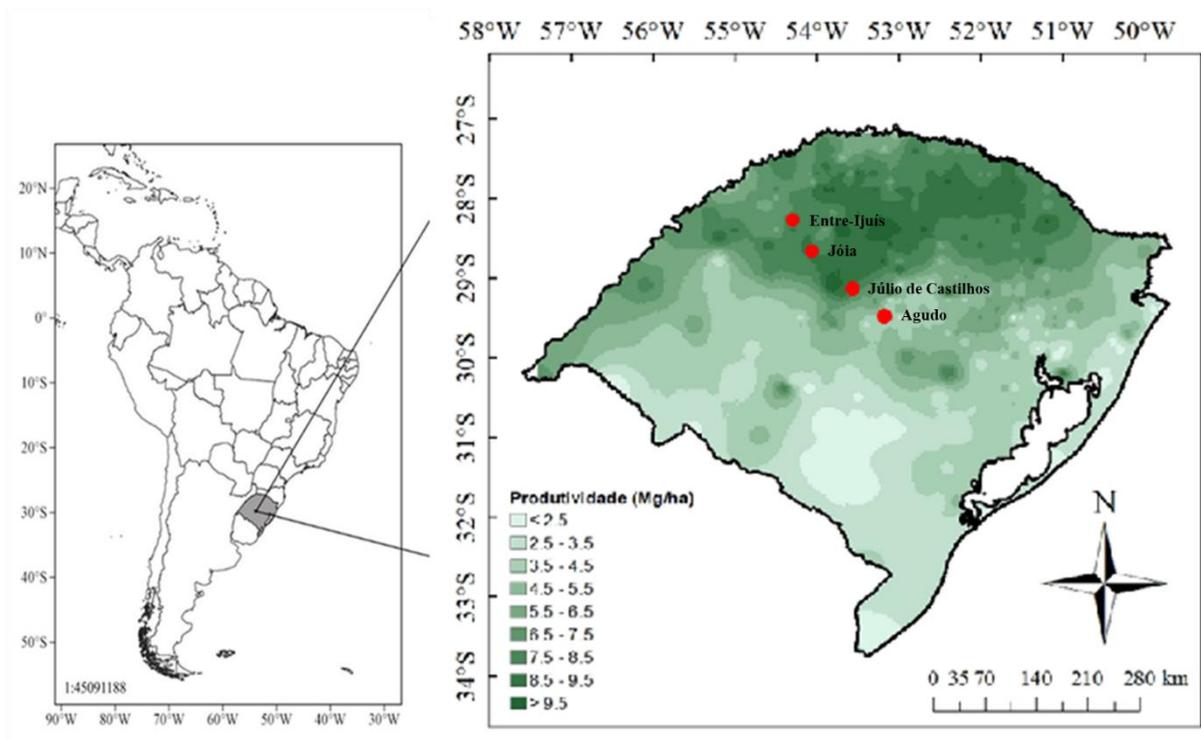
115

116 **Descrição dos experimentos**

117

118 Os experimentos foram conduzidos em lavouras comerciais localizadas no Rio Grande
 119 do Sul (RS), sul do Brasil, nos municípios de Júlio de Castilhos (JC) na safra 2018/2019 e Entre-
 120 Ijuís (EI), Jóia (JO), Agudo (AG) e Júlio de Castilhos (JC) na safra 2019/2020 (Figura 1). O
 121 clima destes locais é classificado como subtropical úmido com verão quente e sem estação seca
 122 definida (Cfa) (Kuinchtner & Buriol, 2001).

123



124

125

126 **Figura 1** - Produtividade média de milho dos últimos 5 anos (2015-2019) no estado do Rio
 127 Grande do Sul e a localização das áreas experimentais (círculos vermelhos). Os experimentos
 128 foram conduzidos durante duas safras em Júlio de Castilhos (2018/2019 e 2019/2020) e na safra
 129 de 2019/2020 em Agudo, Jóia e Entre-Ijuís no Rio Grande do Sul, Brasil.

130 A partir da produtividade média alcançada na DAO nos experimentos, foi possível
 131 estabelecer uma classificação em três faixas de produtividade, desta forma, os ambientes de
 132 produção foram classificados como de baixa (<10 Mg.ha⁻¹), média (10 e 16 Mg.ha⁻¹), e alta
 133 (> 16 Mg.ha⁻¹) produtividade. Assim, o ambiente de JC foi identificado como de alta
 134 produtividade (AP), JO e EI ambientes de média produtividade (MP) e AG ambiente de baixa
 135 produtividade (BP). A classificação de ambientes de produção em função da produtividade em
 136 resposta da densidade, está baseada na classificação realizada em lavouras de milho nos Estados
 137 Unidos (Assefa et al., 2016) e Brasil (Schwalbert et al., 2018) . Os experimentos mantiveram o
 138 manejo padrão realizado nas lavouras comerciais de milho pelos produtores, representando
 139 desta forma, a realidade técnica e socioeconômica de cada ambiente de produção.

140

141 **Tabela 1** - Caracterização das áreas experimentais, bem como os híbridos utilizados com sua
 142 maturidade até a maturidade fisiológica e respectivas densidades e época de semeadura em
 143 2018/2019 e 2019/2020 em quatro locais no Rio Grande do Sul.

144

Local	Localização	Altitude (m)	Data de semeadura	Híbridos (maturidade)	Densidade de plantas (*1000.ha ⁻¹)	Solo	
						Tipo	Classe Textural
Júlio de Castilhos	29° 11' S, 53° 36' O	513	07/09/2018 24/08/2019	AG9025(1634 GDD) AG9025 (1634 GDD), P1630 (1488GDD)	60, 80, 100, 120 ,140	Argissolo	Franco argilosa
Entre-Ijuis	28° 31' S, 54° 22' O	339	16/08/2019	DKB230 (1488GDD), AS1666 (1634 GDD), AG9025 (1634 GDD), P2501 (1634 GDD), P3016 (1710 GDD)	70, 90, 110	Latossolo	Argilosa
Jóia	28° 46' S, 53° 58' O	332	25/09/2019	AG9025(1634 GDD), AS1666 (1634 GDD)	70, 80, 90, 100	Latossolo	Argilosa
Agudo	29° 40' S, 53° 14' O	81	07/12/2019	AG9025(1634 GDD), P30F53 (1710 GDD)	60, 80, 100, 120 ,140	Argissolo	Franco argiloso arenosa

145

146 Os experimentos foram conduzidos com delineamento experimental de blocos
 147 inteiramente casualizados com quatro repetições de 8 linhas de cinco metros, totalizando 20 m².

148 A irrigação suplementar da cultura, foi realizada de acordo com as demandas das plantas e
149 através de pivô central em JC, EI e JO, e com aspersores em Agudo. Para estabelecer a
150 densidade de plantas desejada e o espaçamento uniforme entre plantas, realizamos a semeadura
151 com uma quantidade maior de sementes e no estágio V1 a V2 foi realizado o raleio das plantas
152 (Ritchie et al., 1993).

153 Após as plantas atingirem o estágio R6 (Ritchie et al., 1993), realizamos a mensuração
154 dos componentes de rendimento em cinco plantas por parcela. Os componentes de
155 produtividade avaliados foram o diâmetro do colmo no primeiro entrenó, altura da inserção da
156 espiga e altura das plantas até a folha bandeira. Em seguida, coletamos as espigas das mesmas
157 plantas para realizar a contagem do número de grãos por fileira, o número de fileiras de grãos
158 por espiga e peso de 1000 grãos. Uma área de 5 m² foi colhida para estimativa da produtividade
159 (corrigida para 155 g.kg⁻¹ de umidade).

160

161 **Simulações com o modelo Hybrid-Maize**

162

163 Para realizar as simulações do potencial de produtividade dos locais onde estavam
164 situados os experimentos, foi utilizado o modelo Hybrid-Maize (Yang et al., 2004; Yang et al.,
165 2006). Os dados de entrada do modelo Hybrid-Maize foram o ciclo da cultivar em graus dias
166 acumulados (GDD), data de semeadura, população de plantas, irrigação, umidade solo,
167 porcentagem de cobertura do solo no momento da semeadura e dados meteorológicos. Os dados
168 meteorológicos (temperatura máxima e mínima, radiação solar) foram obtidos das estações
169 meteorológicas automáticas e manuais mais próximas dos experimentos.

170 Para melhor representar as interações entre genética, ambiente e manejo, realizamos a
171 calibração e a validação do modelo Hybrid-Maize (Van Ittersum et al., 2013). Calibramos a
172 variável número potencial de grãos, que foi definida de acordo com a avaliação de 95% dos

173 indivíduos em um espaço amostral de 304 espigas. Para representar os diferentes ciclos de
174 híbridos utilizados pelos produtores nos ambientes de produção, utilizamos a soma térmica
175 acumulada de cada ciclo até o estágio R6 (momento em que ocorre o acúmulo da camada preta
176 na base do grão). Para isso, realizamos amostras destrutivas de espigas, desde o estágio R5 até
177 o início do estágio R6. Após estas determinações, comparamos a produtividade simulada com
178 os dados observados nos experimentos.

179

180 **Análises estatísticas**

181

182 A relação entre as variáveis diâmetro de colmo, altura de planta, altura de espiga, fileiras
183 por espiga, grãos por fileira, peso de 1000 grãos, densidade de plantas e produtividade, foram
184 calculadas a partir do coeficiente de correlação de Pearson (r). Testamos a significância dos
185 coeficientes a partir do p-valor, a 10 %, 5 % e 1 % de probabilidade de erro. O coeficiente
186 correlação de Pearson e o p-valor foram calculados com o auxílio do programa Microsoft Office
187 Excel®, a partir da média de cada tratamento, sendo composto por 20 plantas (5 plantas por
188 parcela), totalizando 300 plantas no ambiente de AP, 380 plantas no ambiente de MP e 200
189 plantas no ambiente de BP.

190 Para quantificar isoladamente a influência dos componentes de produtividade para
191 alcançar a DAO foi utilizado a metodologia não paramétrica denominada função limite proposta
192 por French & Schultz (1984) e amplamente utilizada em estudos ecofisiológicos (Zanon et al.,
193 2016; Tagliapietra et al, 2018; Santos Hansel, et al., 2019; Tagliapietra et al, 2021; Ribas et al.,
194 2021). Foram ajustadas funções limite para a relação entre os componentes de produtividade e
195 a produtividade de milho, sendo utilizada uma função do tipo quadrática (1) para determinar os
196 valores ótimos dos componentes de produtividade como altura de planta, altura da espiga, peso

197 de 1000 grãos, diâmetro do colmo, altura da planta e altura da inserção da espiga que
198 proporcionaram as produtividades mais elevadas:

$$199 \quad Y_V = ax^2 + bx + c \quad (1)$$

200 onde os valores a, b e c, são parâmetros do modelo da equação e o x são os valores dos
201 componentes de rendimento. Resultando respectivamente nos valores de -0,597, 17,809 e -
202 112,94 para o número de fileiras por espiga, -0,088, 5,764 e -74,31 para o número de grãos por
203 fileira, -0,0003, 0,229 e -31,70 para o peso de mil grãos, -50,249, 238,62 e -262,69 para altura
204 de planta, -52,106, 141,82 e -76,39 para altura de espiga e -13,968, 63,652 e -52,54 para o
205 diâmetro de colmo.

206 Desta forma, quando o aumento do componente de produtividade não provoca um
207 incremento superior a 0,1% na produtividade, é considerado o valor ótimo do componente de
208 produtividade.

209

210 **Determinação da radiação fotossinteticamente ativa**

211

212 Para avaliar a interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e a eficiência
213 das plantas em interceptá-la, a partir diferença da RFA incidente (RFA_{in}) e RFA transmitida
214 (RFA_t), foram instaladas barras de radiação solar de 1 m de comprimento compostas por 5
215 fotocélulas de silício amorfo. Havendo uma barra de radiação acima do dossel, visando
216 mensurar a RFA_{in}. Já para determinar a RFA_t, as barras de radiação foram posicionadas nas
217 linhas centrais e próximas ao centro das parcelas, estando a 0,05 m acima do nível do solo e
218 longitudinalmente e transversalmente niveladas.

219 As barras de radiação foram instaladas 34 dias após a semeadura, sendo feita a leitura a
220 cada 15 minutos e armazenados no data logger CR 200 Campbell Scientific® da estação
221 meteorológica presente no experimento. As densidades utilizadas para realizar as medições de

222 radiação foram de 60 mil pl.ha⁻¹, 80 mil pl.ha⁻¹, 100mil pl.ha⁻¹ e 120mil pl.ha⁻¹, no híbrido AG
223 9025 no ambiente de produção de JC na safra 2019/2020.

224

225 RESULTADOS E DISCUSSÃO

226

227 **Relação entre produtividade e densidade de plantas em ambientes de produção**

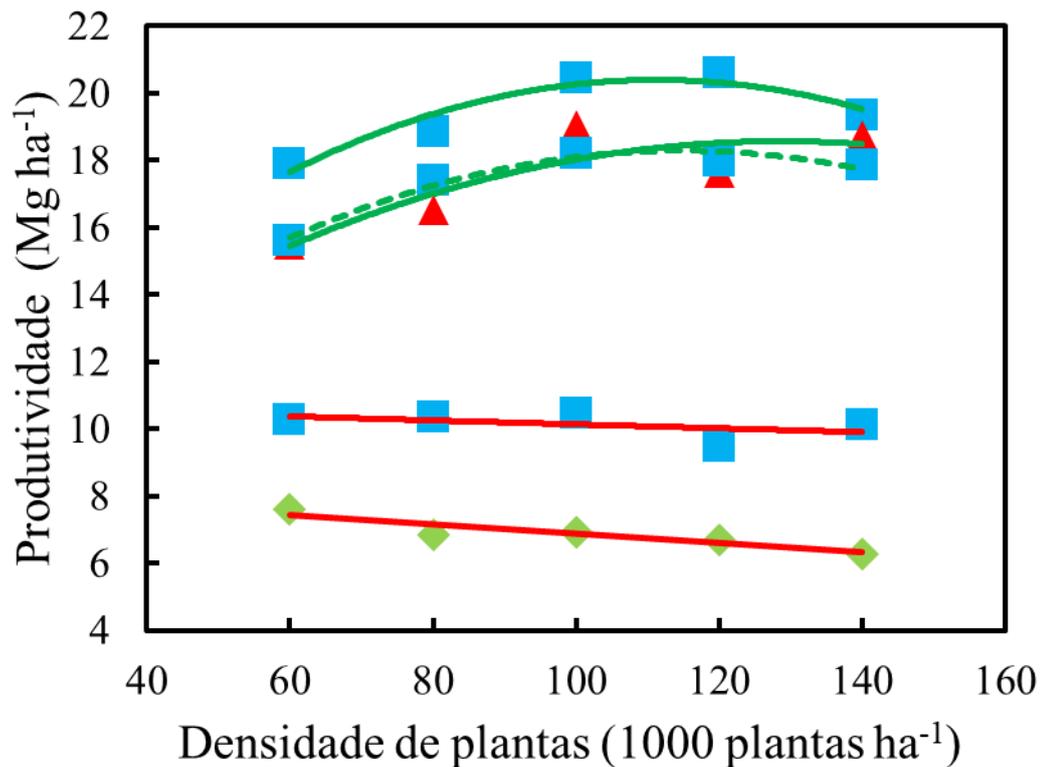
228

229 A produtividade segue uma curva quadrática em relação a densidade no AP e uma
230 regressão linear negativa para o ambiente de BP a partir 60 mil plantasha⁻¹ (Figura 2). A
231 densidade agrônômica ótima para o ambiente AP semeado na safra 2019-2020 foi de 116,2 mil
232 pl.ha⁻¹ com produtividade de 21,0 Mg.ha⁻¹. O incremento médio em produtividade da densidade
233 de 60 mil pl.ha⁻¹ até a densidade agrônômica ótima foi de 3 Mg.ha⁻¹, ou seja, 55,2 kg.ha⁻¹ a
234 cada mil plantas.ha⁻¹ a mais (Tabela 2). Na safra 2018-2019, o híbrido AG9025 (linha
235 tracejada/Figura 2) atingiu a máxima produtividade (17,8 Mg.ha⁻¹) na densidade de 110,3
236 milpl.ha⁻¹, resultando em um incremento médio de 43,7 kg.ha⁻¹ a cada mil plantas ha⁻¹ a mais
237 (Tabela 2), um incremento inferior a safra 2019-2020 (Figura 2). Para a mesma safra, o híbrido
238 hiper-precoce P1630, a densidade agrônômica ótima encontrada foi de 121,8 mil plantas.ha⁻¹,
239 com produtividade de 18,0 Mg.ha⁻¹, havendo um incremento de 2,5 Mg.ha⁻¹ em relação à
240 densidade de 60 mil pl.ha⁻¹. O aumento médio de produtividade foi de 40,5 kg.ha⁻¹ com o
241 incremento de mil plantas.ha⁻¹. Os aumentos de produtividade em função do aumento de
242 densidade no ambiente de AP, podem ser explicados pela limitação de drenos (grãos) das
243 plantas em densidades baixas e elevada disponibilidade de recursos do ambiente, sendo o
244 aumento da densidade de plantas uma estratégia eficaz para diminuir ou eliminar esse fator
245 limitante (Sarlangue et al., 2007).

246 O ambiente de BP (Figura 2), teve decréscimos na produtividade a partir de 60 mil
247 plantas.ha⁻¹. A penalização na produtividade dos híbridos AG9025 (hiperprecoce) e P30F53
248 (precoce) foi de 5,9 kg. ha⁻¹ e 14,0 kg. ha⁻¹ com o acréscimo de mil plantas.ha⁻¹, respectivamente
249 (Tabela 2). Portanto, o uso de densidades superiores a que o ambiente suporta, ocasiona um
250 decréscimo na combinação dos componentes de rendimento que não é compensado pelo maior
251 número de plantas, em virtude da limitação de recursos (Poneleit; Egli, 1979). Um exemplo, é
252 o aumento da esterilidade feminina com o aumento da densidade de plantas relatado por
253 Norwood et al. (2001), onde o autosombreamento em altas densidades provoca o assincronismo
254 entre a emissão do pendão e dos estilo-estigmas pela maior dominância apical, dificultando
255 assim a polinização. O efeito disso, é o desalinhamento e redução no número de fileiras por
256 espiga (Ribeiro et al., 2020). A menor produtividade do híbrido P30F53 em relação ao híbrido
257 AG9025 (Figura 2), também está relacionado à época de semeadura tardia, pois, o híbrido
258 P30F53 possui um ciclo maior e portanto, os estágios reprodutivos coincidem com um período
259 de menor temperatura e radiação solar, estando assim, exposto as condições adversas por um
260 período mais longo (Tsimba et al., 2013).

261

262



263

264

265 **Figura 2** – Produtividade (15,5 % de umidade) *versus* a densidade de plantas em dois
 266 ambientes de produção, sendo o ambiente de AP (linhas verdes) e o ambiente de BP (linhas
 267 vermelhas), semeados na safra 2018-2019 (linha tracejada) e na safra 2019-2020 (linha
 268 contínua). O quadrado azul representa o híbrido AG9025, o triângulo vermelho o P1630, o
 269 losango verde o P30F53. As equações estão descritas na tabela 2.

270

271 Os resultados indicam que a densidade agronômica ótima depende da cultivar e do
 272 ambiente, estando de acordo com os resultados encontrados por Tokatlidis et al., (2011), onde
 273 testaram 7 cultivares na Grécia e 7 cultivares na Romênia em duas safras (2006 e 2007),
 274 ocorrendo respostas distintas em relação densidade. Da mesma forma, nossos resultados estão
 275 de acordo com Tokatlidis et al., (2013), que demonstram a variação de 27,6 mil pl.ha⁻¹ a 112,0
 276 mil pl.ha⁻¹ da densidade agronômica ótima com a alteração do ambiente de produção.

277

278 **Tabela 2** - Representação das combinações dos híbridos de milho (Figura 1) e ambientes de
 279 produção, sendo a linha verde o ambiente de alta produtividade e a linha vermelha no ambiente
 280 de baixa produtividade, semeados na safra 2018-2019 (linha tracejada) e na safra 2019-2020
 281 (linha contínua) e as respectivas equações, coeficiente de determinação (R^2), p-valor (95%) e
 282 95% de intervalo de confiança (95% IC) para densidades menor e maior da densidade
 283 agrônômica ótima (DAO), bem como, para potencial de produtividade a 15,5% de umidade da
 284 DAO.

285

Combinação	Híbrido	Local	Equação	R^2	p-valor	Densidade de plantas (X)			Produtividade (Y)		
						DAO	95% CI		DAO	95% CI	
							Menor	Maior		Menor	Maior
						*1000 pl.ha ⁻¹		Mg.ha ⁻¹			
1	■	—	$y = -0,001x^2 + 0,2323x + 7,48$	0,91	0,23	116,2	111,1	122,0	20,97	20,94	20,94
2	■	- - -	$y = -0,0009x^2 + 0,1985x + 6,89$	0,97	0,13	110,3	106,0	116,0	17,84	17,82	17,81
3	■	—	$y = -0,0059x + 10,72$	0,22	0,42	60,0	60,0	60,0	10,26	10,26	10,26
4	▲	—	$y = -0,0007x^2 + 0,1705x + 7,61$	0,77	0,09	121,8	116,0	129,0	17,99	17,96	17,95
5	◆	—	$y = -0,014x + 8,27$	0,86	0,02	60,0	60,0	60,0	7,59	7,59	7,59

286

287

288 A produtividade dos experimentos de AP (JC 19/20) e MP (EI), foram de 19,5 e 15,9
 289 respectivamente, sendo superiores aos valores simulados pelo modelo Hybrid-maize (18,4 e
 290 14,3 Mg ha⁻¹). Esses resultados corroboram com Salvagiotti et al., (2008) que, também
 291 encontraram valores inferiores de produtividade simulada pelo modelo CropGrow para soja,
 292 em relação a produtividade alcançada em experimentos conduzidos na condição potencial no
 293 oeste do Corn Belt dos Estados Unidos. Isso significa que os modelos ecofisiológicos precisam
 294 ser recalibrados à medida que ocorrem avanços genéticos e de manejo que implicam em
 295 incrementos significativos de potencial de produtividade.

296

297

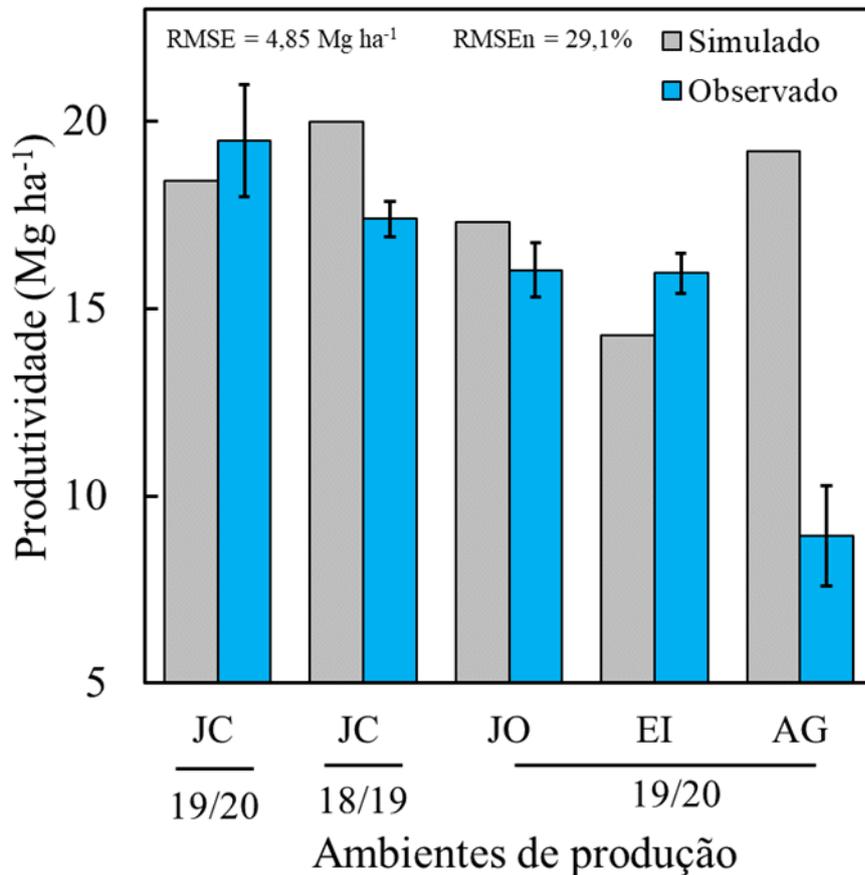
298

299

A raiz quadrada média do erro (RQME) e raiz quadrada média do erro normalizada (RQMEn), 4,85% e 29,1%, respectivamente, foram superiores aos valores encontrados por Agustiani, et al., (2018) (RQME = 1,17 Mg.ha⁻¹e RMSEn = 9%), quando realizaram a calibração e a validação do modelo Hybrid-Maize em quatro safras com duas densidades na

300 Indonésia. O nível mais elevado de erro está relacionado principalmente ao ambiente de AG
 301 (Figura 3), sendo a semeadura realizada tardiamente (dezembro), faz com que o modelo simule
 302 uma produtividade maior, sendo muito sensível ao aumento o duração das fases de enchimento
 303 de grãos (Yang et al., 2006), que ocorre pela menor média de temperatura diária nessas fases
 304 em semeaduras tardias, havendo limitações do modelo em reproduzir o potencial de
 305 produtividade nessas condições.

306



307

308

309 **Figura 3** – Relação entre a simulação do potencial de produtividade a partir do modelo
 310 “Hybrid-Maize” (Simulado) e observado na densidade agrônômica ótima nos experimentos
 311 (Observado), para os ambientes de produção a 15,5% de umidade. As siglas JC (Júlio de
 312 Castilhos), JO (Jóia), EI (Entre-Ijuís) e AG (Agudo) representam os ambientes de produção,
 313 sendo considerado de alta produtividade o JC 18/19 e JC 19/20, média produtividade JO e EI e

314 baixa produtividade AG. São mostrados a raiz quadrada média do erro (RMSE) e o erro
315 quadrado médio normalizado (RMSEn, %). Barras de erro representam o erro padrão.

316

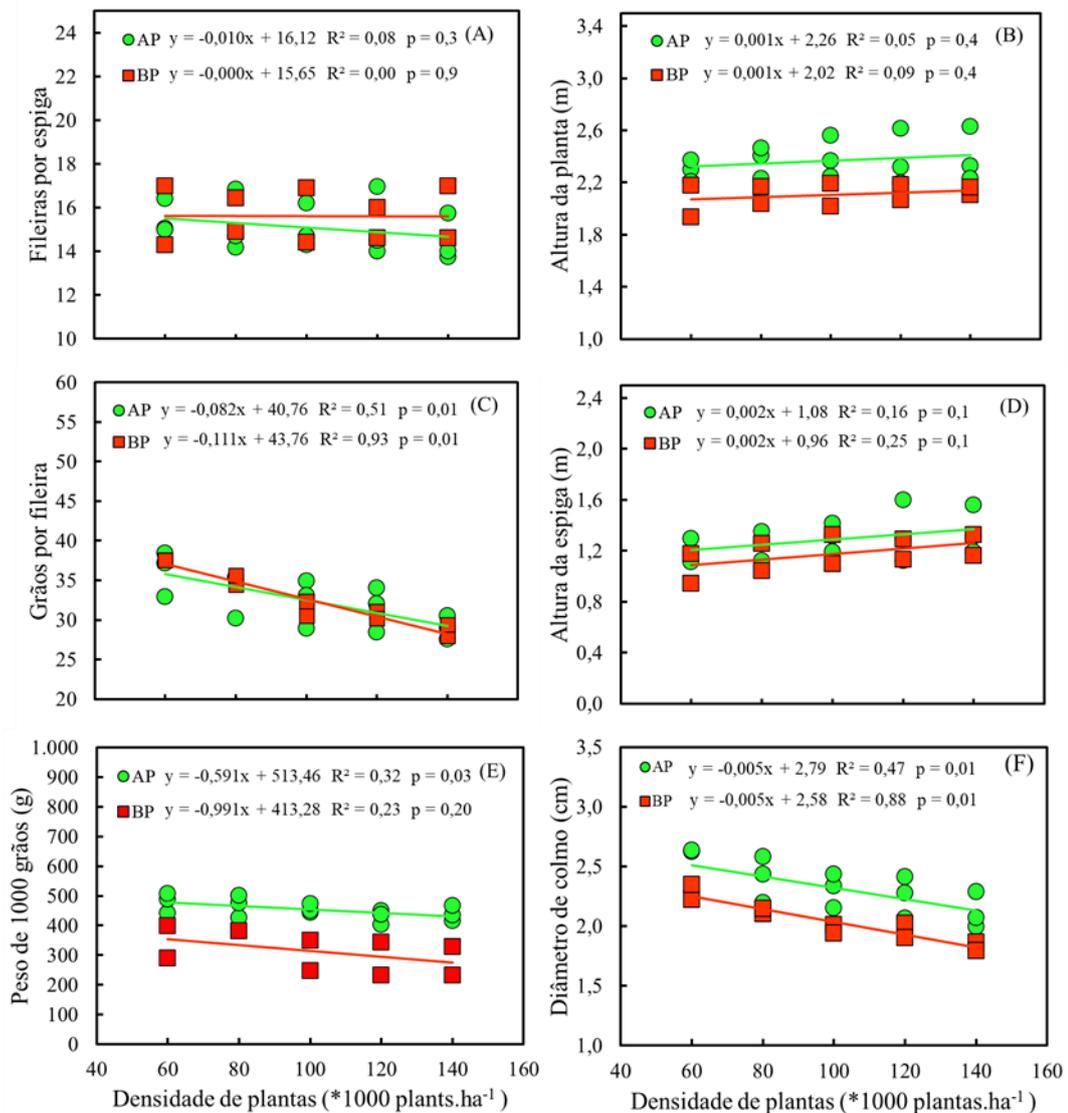
317 O aumento na densidade de plantas reduziu o número de fileiras por espiga, número de
318 grãos por fileira, peso de 1000 grãos e diâmetro de colmo (Figura 4). Estresses ocasionados
319 pela competição entre plantas ocasionam um maior abortamento de óvulos em
320 consequentemente menor número de grãos por fileira, em função do maior assincronismo entre
321 o pendoamento e a exposição dos estilo-estigmas (Cicchino et al., 2010). A disponibilidade de
322 recursos na fase de enchimento de grãos influencia diretamente o peso de grãos (Novacek et
323 al., 2014), o que explica o menor peso de grãos em densidades mais elevadas. O número de
324 fileiras, é fortemente relacionado a características genéticas e por isso, é afetado com menor
325 intensidade pelas variações na densidade (Hashemi et al., 2005).

326 O número de grãos por fileira reduziu com o aumento da densidade (Figura 4 C), e não
327 variou por ambiente de produção (33 grãos por fileira). O aumento da densidade de 60 mil pl.ha⁻¹
328 para 140 mil pl.ha⁻¹, ocasionou o decréscimo de 24% e 19% no número de grãos por fileira ,
329 nos ambientes de BP e AP, respectivamente. Decréscimos similares no número de grãos por
330 fileira, em decorrência do aumento da densidade de plantas, também foram encontrados por
331 (Lindsey & Thomison, 2016; Milander et al., 2016), em três híbridos de milho semeados em
332 Nebraska e na Croácia, onde o aumento de 65 mil pl.ha⁻¹ para 105mil pl.ha⁻¹ resultou em 19%
333 a menos de grãos por fileira.

334 O peso médio de 1000 grãos foi de 444 g para o ambiente de AP e 312 g para o ambiente
335 de BP (Figura 4 E). Quando isolado o fator densidade, há um decréscimo no peso de mil grãos
336 de aproximadamente 1g a cada mil plantas.ha⁻¹ a mais no ambiente BP. Por outro lado, no
337 ambiente de AP, ocorre a redução de 1g no peso de grãos quando a densidade é aumentada em
338 aproximadamente 1,7 mil plantas.ha⁻¹, a partir de 60 mil plantas.ha⁻¹. Portanto, o peso de 1000

339 grãos em um ambiente de BP, sofre um decréscimo 59% maior em relação a um ambiente de
340 AP com o aumento do número de plantas. Resultados semelhantes, foram descritos , onde o
341 peso de grãos foi penalizado em 1 g a cada incremento de 1,7 mil plantas.ha⁻¹ com o aumento
342 da densidade de 69 mil pl.ha⁻¹para 105mil pl.ha⁻¹ para três híbridos em Nebraska, USA
343 (Milander et al., 2016; Novacek et al., 2013). A maior perda no peso de 1000 grãos também é
344 explicada pela época de semeadura do ambiente BP. No RS, quando a semeadura do milho é
345 realizada no mês de dezembro, a fase de enchimento de grãos é exposta a uma condição restrita
346 de temperatura e radiação solar, resultando em menor coeficiente fototérmico quando
347 comparado a semeaduras realizadas mais cedo (mês de setembro) como no ambiente de AP
348 (Ribeiro et al., 2020).

349



350

351

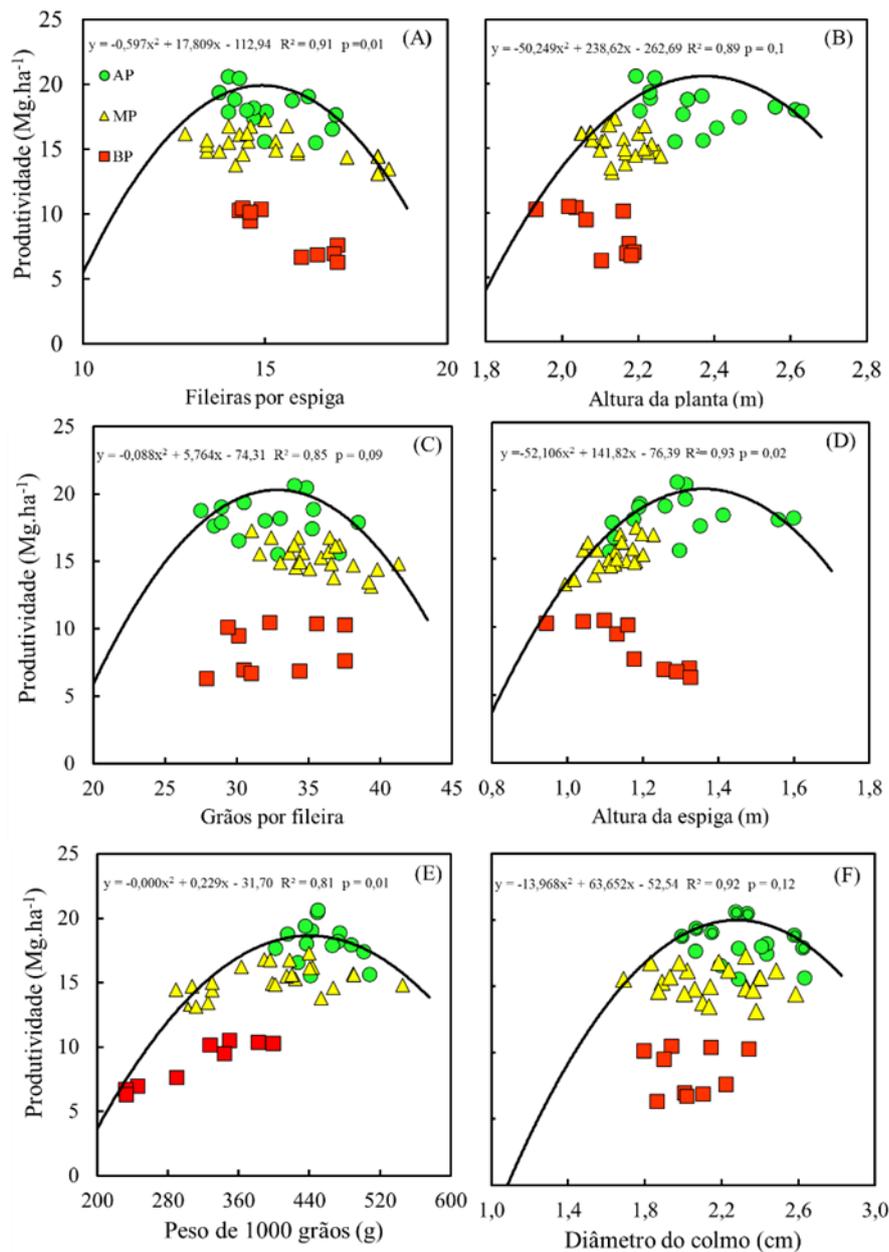
352 **Figura 4** - Relação dos componentes de rendimento e a densidade, em ambiente de alta
 353 produtividade (AP, círculo verde) e baixa produtividade (BP, quadrado vermelho). O painel
 354 mostra a resposta do número de fileiras por espiga em (A), altura de planta em (B), grãos por
 355 fileira em (C), altura de espiga em (D), peso de 1000 grãos em (E) e o diâmetro do colmo em
 356 (F).

357

358 A partir dos componentes de rendimento (Figura 5), podemos determinar as
 359 características ideais que uma planta de milho deve apresentar para expressar o potencial

360 produtivo. Assim, plantas que tiverem 2,36 m de altura, com altura da inserção da espiga em
361 1,35 m e com colmo de 2,21 cm de diâmetro, possuem uma estrutura ideal para propiciar altas
362 produtividades. Por outro lado, o valor encontrado para a altura de planta é inferior e a altura
363 de inserção da espiga é superior aos resultados encontrados por (Liu et al., 2017) na China ,
364 onde classificaram como valores ótimo de um dossel para atingir 22 Mg.ha⁻¹, a altura de planta
365 e altura de inserção de espiga de 2,87 m e 1,12 m, respectivamente. Essa maior altura de planta
366 encontrada na China, pode estar relacionada a altitude do local (>1000 m), havendo menos
367 gastos com respiração, conseqüentemente ocorrendo um crescimento maior das plantas. A
368 partir dos valores ótimos dos componentes de produtividade, uma lavoura com 116,2 mil pl.ha⁻¹
369 ¹ (considerando uma espiga por planta), com 14,8 fileiras por espiga, 31,7 grãos por fileira e
370 peso de 1000 grãos de 402 g permite produzir 21,9 Mg.ha⁻¹ de milho.

371



372

373 **Figura 5**– Função limite para determinar a relação dos componentes de rendimento do milho e
 374 a produtividade de grãos a 15,5% de umidade em ambientes de alta produtividade de grãos (AP,
 375 círculo verde), media produtividade de grãos (MP, triângulo amarelo) e baixa produtividade de
 376 grãos (BP, quadrado vermelho). O painel mostra a resposta do número de fileiras por espiga em
 377 (A), altura de planta em (B), grãos por fileira em (C), altura de espiga em (D), peso de 1000
 378 grãos em (E) e diâmetro de colmo em (F).

379

380 **Correlações de Pearson entre componentes de rendimento, densidade e produtividade**
381

382 As correlações demonstram com nitidez a influência da densidade de plantas nos
383 ambientes de produção (Tabela 3). A densidade demonstrou uma correlação positiva com a
384 produtividade para o ambiente de AP ($r = 0,57^{**}$) e MP ($r = 0,40^*$), e correlação negativa
385 (desprezível) ($r = -0,17$), para o ambiente de BP. Essa resposta, aumento de produtividade com
386 o aumento da densidade em ambientes de AP e MP, devido aos altos níveis de recursos
387 disponíveis, suportando uma maior densidade de plantas (Norwood, 2001). Por outro lado, a
388 correlação negativa no ambiente de BP, elucida que não devem ser utilizadas densidades
389 superiores a 60 mil plantas.ha⁻¹.

390 Dentre os CR que tiveram maior correlação com a produtividade, podemos citar a altura
391 da espiga para o ambiente de MP ($r = 0,59^{***}$), estando essa característica relacionada a
392 densidade (Monneveux et al., 2005), e o peso de grãos para o de BP ($r = 0,95^{***}$). Por outro
393 lado, para o ambiente de AP, os componentes não apresentaram correlação significativa com a
394 produtividade, mantendo-se mais estáveis em relação aos outros ambientes, sendo assim, a
395 produtividade foi maximizada principalmente devido ao aumento da densidade ($r = 0,57^{**}$).

396

397

398

399

400

401

402

403

404

405

406 **Tabela 3** - Correlação de Pearson para ambientes de alta, média e baixa produtividade entre
 407 diâmetro de colmo (DC), altura de planta (AP), altura de espiga (AE), espigas por planta (EP),
 408 número de fileiras por espiga (FE), número de grãos por fileira (GF), peso de mil grãos (PG),
 409 densidade de plantas (DP) e produtividade de grãos (PR).

410

Ambientes de produção		Componentes de rendimento								
		DC	AP	AE	EP	FE	GF	PG	DP	PR
Alta produtividade	DC		0,07	0,27	-0,30	-0,38	0,89***	0,86***	-0,69***	-0,26
	AP	0,07		0,70***	0,39	-0,04	-0,30	0,11	0,22	-0,32
	AE	0,27	0,70***		-0,10	-0,71***	0,04	0,30	0,40	0,19
	EP	-0,30	0,39	-0,10		0,29	-0,34	-0,45	0,25	0,18
	FE	-0,38	-0,04	-0,71***	0,29		-0,39	-0,48*	-0,28	-0,52**
	GF	0,89***	-0,30	0,04	-0,34	-0,39		0,79***	-0,72***	-0,10
	PG	0,86***	0,11	0,30	-0,45	-0,48*	0,79**		-0,57**	-0,22
	DP	-0,69***	0,22	0,40	0,25	-0,28	-0,72***	-0,57**		0,57**
	PR	-0,26	-0,32	0,19	0,18	-0,52**	-0,10	-0,22	0,57**	
Média produtividade	DC		-0,22	-0,49**	0,18	0,38*	0,20	-0,25	-0,42**	-0,14
	AP	-0,22		0,39*	0,09	0,04	0,44**	-0,09	-0,05	-0,24
	AE	-0,49**	0,39*		-0,13	-0,59***	-0,21	0,28	0,47**	0,59***
	EP	0,18	0,09	-0,13		0,15	-0,06	-0,03	-0,15	-0,21
	FE	0,38*	0,04	-0,59***	0,15		0,19	-0,80***	0,07	-0,53***
	GF	0,20	0,44**	-0,21	-0,06	0,19		-0,07	-0,48**	-0,58***
	PG	-0,25	-0,09	0,28	-0,03	-0,80***	-0,07		-0,40*	0,35
	DP	-0,42**	-0,05	0,47**	-0,15	0,07	-0,48**	-0,40*		0,40*
	PR	-0,14	-0,24	0,59***	-0,21	-0,53***	-0,58***	0,35	0,40*	
Baixa produtividade	DC		-0,34	-0,49	0,64**	0,03	0,93***	0,38	-0,94***	0,07
	AP	-0,34		0,83***	-0,51	0,72**	-0,35	-0,80***	0,30	-0,71**
	AE	-0,49	0,83***		-0,79***	0,81***	-0,62*	-0,97***	0,50	-0,89***
	EP	0,64**	-0,51	-0,79***		-0,44	0,75**	0,82***	-0,73**	0,65**
	FE	0,03	0,72**	0,81***	-0,44		-0,11	-0,85***	-0,01	-0,92***
	GF	0,93***	-0,35	-0,62*	0,75**	-0,11		0,56	-0,96***	0,28
	PG	0,38	-0,80***	-0,97***	0,82***	-0,85***	0,56		-0,48	0,95***
	DP	-0,94***	0,30	0,50	-0,73**	-0,01	-0,96***	-0,48		-0,17
	PR	0,07	-0,71**	-0,89***	0,65**	-0,92***	0,28	0,95***	-0,17	

411

412

413 * Significativo ao nível de 0,10 de probabilidade de erro.

414 ** Significativo ao nível de 0,05 de probabilidade de erro.

415 *** Significativo ao nível de 0,01 de probabilidade de erro.

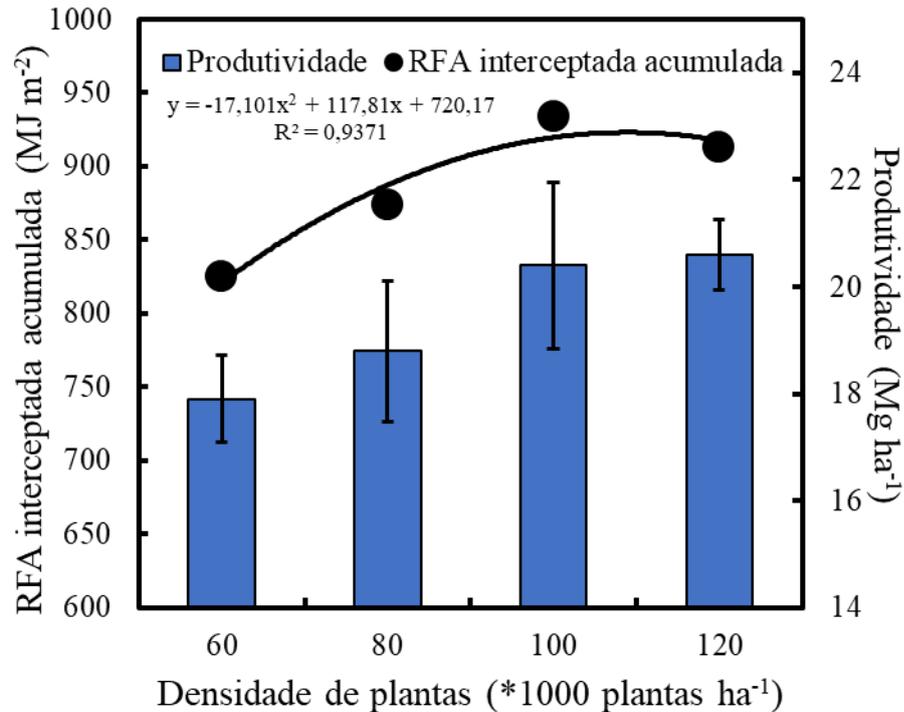
416 Radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada e sua relação com a produtividade

417

418 A menor RFA interceptada foi na densidade de 60 mil pl.ha⁻¹ (825,5 MJ.m⁻²). Isso
419 demonstra que a densidade de plantas foi limitante para expressar um IAF capaz de interceptar
420 uma quantidade maior de RFA, resultando também, na menor produtividade entre as quatro
421 densidades. A densidade de 100 mil pl.ha⁻¹, proporcionou a maior interceptação acumulada de
422 RFA (933,6 MJ.m⁻²), seguida da densidade de 120 mil pl.ha⁻¹ (913,2 MJ.m⁻²). Esses valores,
423 são superiores aos encontrados por Lindquist et al., (2005), onde, em densidades variando de
424 7,1 a 113,0 mil pl.ha⁻¹, encontraram valores inferiores a 800 MJ.m⁻². O menor acúmulo de RFA
425 obtido na densidade de 120 mil pl.ha⁻¹, pode ser explicado pela menor eficiência na
426 interceptação quando comparado a densidade de 100 mil pl.ha⁻¹ nos intervalos entre 45 e 80
427 dias após a semeadura (DAS) e 130 DAS até o final do ciclo (Figura 6). A menor eficiência na
428 interceptação da RFA, neste último período, foi possivelmente ocasionado pela maior taxa de
429 senescência foliar (Figura 8), em função do maior autosombreamento do terço inferior do dossel
430 no final do ciclo (Figueredo Júnior et al., 2005) devido a elevada densidade de plantas (Colomb
431 et al., 2000).

432 Considerando toda a faixa de densidade (60 a 120 mil pl.ha⁻¹), houve um incremento
433 médio de 1,1 MJ.m⁻² de RFA interceptada acumulada durante o ciclo, com o incremento de mil
434 plantas ha⁻¹. A eficiência do uso da RFA e sua conversão em grãos, foi maior na densidade de
435 120 mil pl.ha⁻¹, resultando na produtividade de 22,6 kg.ha⁻¹ de grãos para cada MJ.m⁻²
436 acumulado, seguido pelas densidades de 100, 60 e 80 mil pl.ha⁻¹, com produtividade de 21,9,
437 21,7 e 21,5 kg.ha⁻¹, respectivamente.

438

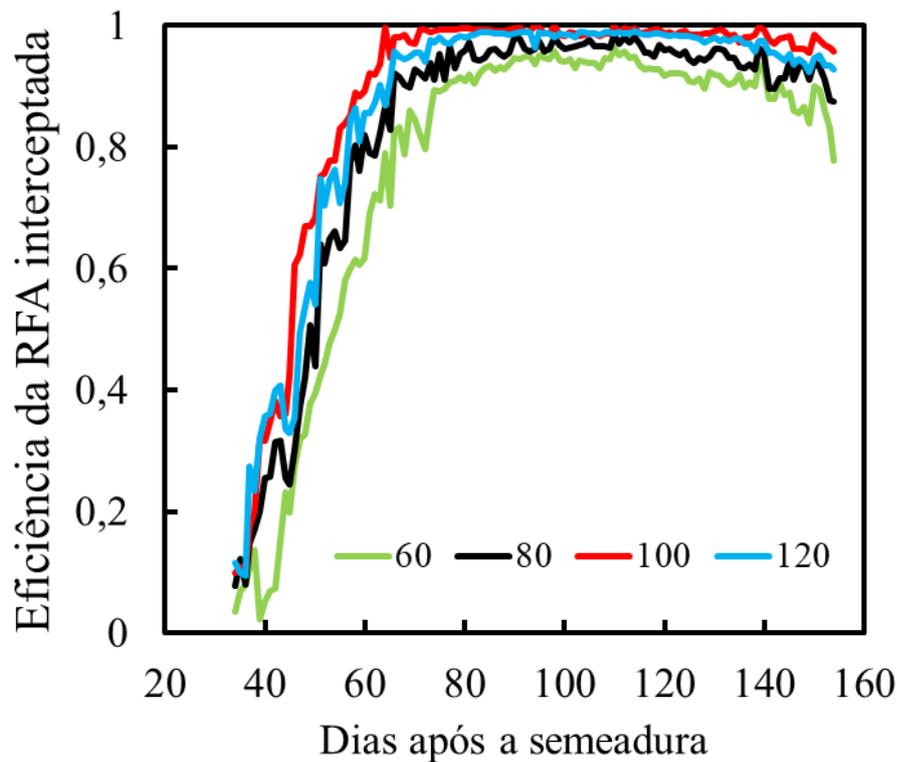


439

440 **Figura 6** – Radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada, acumulada e assimilada
 441 referente as quatro densidades de plantas de milho para o híbrido AG 9025 em Júlio de
 442 Castilhos, um ambiente de alta produtividade, semeado na safra 2019/2020.

443

444 A eficiência na interceptação de RFA apresentou um rápido aumento no início do ciclo
 445 de desenvolvimento, em função do aumento linear da área foliar das plantas. Ocorreu um
 446 decréscimo na taxa de aumento a partir de 60 DAS (Figura 7), ocasionado pelo aumento do
 447 sombreamento no interior do dossel (Bergamaschi & Matzenauer, 2014). As densidades de 100
 448 e 120 mil pl.ha⁻¹ demonstraram estabilidade na eficiência da interceptação de RFA a partir de
 449 80 dias após a semeadura, por outro lado, nas densidades menores, 60 e 80 mil pl.ha⁻¹, essa
 450 estabilidade, em níveis menores de eficiência, ocorreu apenas próximo ao estágio VT (Ritchie
 451 et al., 1993), sendo nesse momento é atingido o número final de folhas (Müller et al., 2005), e
 452 portanto, durante todo o período de emissão de folhas houve incremento na eficiência da
 453 interceptação de RFA, devido ao menor autosombreamento do terço inferior nessas densidades,
 454 em relação as densidades de 100 e 120 mil pl.ha⁻¹.



455

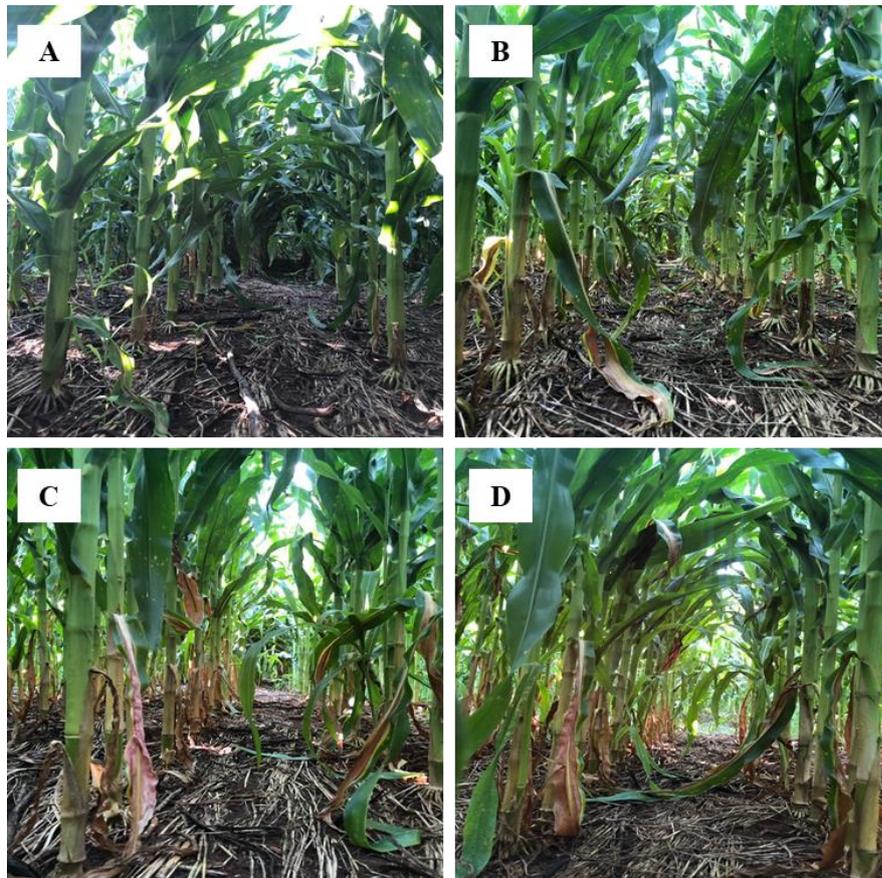
456

457 **Figura 7** – Eficiência da interceptação da radiação fotossinteticamente ativa em relação aos
 458 dias após a semeadura, para densidades de 60, 80, 100 e 120 mil pl.ha⁻¹, em Júlio de Castilhos
 459 semeado na safra 2019/2020.

460

461 A eficiência média da interceptação de RFA para todo o período avaliado, foi maior
 462 para a densidade de 100 mil pl.ha⁻¹, com 89% da RFA incidente interceptada, seguida pelas
 463 densidades de 120, 80 e 60 mil pl.ha⁻¹, com 86%, 82% e 77% da RFA incidente interceptada
 464 (Figura 7), concordando com Liu & Tollenaar, (2009), onde também relatam a menor
 465 interceptação de RFA em um híbrido em densidades de 40 e 60 mil pl.ha⁻¹ em relação a
 466 densidade de 120 mil pl.ha⁻¹. Essa mesma sequência de densidades (100, 120, 80 e 60 mil pl.ha⁻¹)
 467 ¹), também foi encontrada para a máxima RFA interceptada, com os valores de 100%, 99%,
 468 98% e 96%, respectivamente, explicando a maior RFA interceptada acumulada na densidade
 469 de 100 mil pl.ha¹ (Figura 6).

470 Como ocorre uma redução gradativa da área foliar a partir do VT (Figueredo Júnior et
471 al., 2005), as densidades de 60 e 80 mil pl.ha^{-1} tiveram sua eficiência em interceptar RFA
472 afetada antes das densidades mais elevadas (100 e 120 mil pl.ha^{-1}), 115 e 130 DAS,
473 respectivamente (Figura 7). Em densidades menores, a interceptação da radiação é mais
474 distribuída pelo dossel, assim, as folhas do terço inferior possuem uma maior contribuição na
475 interceptação de RFA, e por consequência, nessas densidades a senescência de folhas causa um
476 impacto negativo mais acentuado na eficiência da interceptação de RFA (Figura 8).
477



478

479

480 **Figura 8** – Imagens do terço inferior das plantas de milho no estágio R3, demonstrando o efeito
481 da densidade de plantas na senescência foliar. Representando as densidades de 60 mil pl.ha^{-1}
482 ¹ (A), 80 mil pl.ha^{-1} (B), 100 mil pl.ha^{-1} (C) e 120 mil pl.ha^{-1} (D), do híbrido AG 9025 na safra
483 2019/2020 no município de Júlio de Castilhos, RS. Fonte: Autor e Victória Brittes Inklman.

484 CONCLUSÃO

485

486 1. A densidade agronômica ótima para o ambiente de alta produtividade variou de 110,3 a
487 116,2 mil pl.ha⁻¹. Já para o ambiente BP, a densidade agronômica ótima é de 60 mil
488 pl.ha⁻¹.

489 2. Os componentes agronômicos ótimos encontrados para uma planta de milho visando
490 altas produtividades são 2,36 m de altura, com altura da inserção da espiga em 1,35 m
491 e com colmo de 2,21 cm de diâmetro , tendo 14,8 fileiras por espiga, 31,7 grãos por
492 fileira e peso de 1000 grãos de 402 g.

493

494 REFERÊNCIAS

495

496 AGUSTIANI, N.; DENG, N.; RATTALLINO EDREIRA, J. I.; GIRSANG, S. S.;
 497 SYAFRUDDIN; SITARESMI, T.; PASUQUIN, J. M. C.; AGUS, F.; GRASSINI, P.
 498 Simulating rice and maize yield potential in the humid tropical environment of Indonesia.
 499 **European Journal of Agronomy**, v.101, p.10-19, 2018. DOI:
 500 <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.08.002>

501

502 ASSEFA, Y.; VARA PRASAD, P. V.; CARTER, P.; HINDS, M.; BHALLA G.; SCHON, R.;
 503 JESCHKE, M.; PASZKIEWICZ, S.; CIAMPITTI, I. A. Yield responses to planting density for
 504 us modern corn hybrids: a synthesis-analysis. **Crop Science**, v.56, p.2802-2817, 2016. DOI:
 505 <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.04.0215>

506

507 ASSEFA, Y.; CARTER, P.; HINDS, M.; BHALLA G.; SCHON, R.; JESCHKE, M.;
 508 PASZKIEWICZ, S.; SMITH, S.; CIAMPITTI, I. A analysis of long term study indicates both
 509 agronomic optimal plant density and increase maize yield per plant contributed to yield gain.
 510 **Scientific Reports**, v.8, n.1, p.1-11, 2018. | DOI:10.1038/s41598-018-23362-x

511

512 BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O Milho e o Clima**. Porto Alegre: Emater/RS-
 513 Ascar, 2014. 84p.

514

515 CARCIOCHI, W.D.; SCHWALBERT, R.; ANDRADE, F.H.; CORASSA, G.M.; CARTER,
 516 P.; GASPAR, A. P.; SCHMIDT, J.; CIAMPITTI, I.A. Soybean seed yield response to plant
 517 density by yield environment in north america. **Agronomy Journal**, v.111, p.1923-1932, 2019.
 518 DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0635>

519

520 CASSMAN, K. G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D.; YANG, H.; Meeting cereal demand
 521 while protecting natural resources and improving environmental quality. **Annual Review of**
 522 **Environment and Resources**, v.28, p.315-358, 2003. DOI: [doi:
 523 10.1146/annurev.energy.28.040202.122858](https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.040202.122858)

524

525 CICCHINO, M.; RATTALINO EDREIRA, J. I.; URIBELARREA, M.; OTEGUI, M. E. Heat
 526 stress in field-grown maize: response of physiological determinants of grain yield. **Crop**
 527 **Science**, v.50, p.1438-1448, 2010. DOI: [10.2135/cropsci2009.10.0574](https://doi.org/10.2135/cropsci2009.10.0574)

528

529 CIRILO, A. G. ;ANDRADE, F. H. Sowing date and maize productivity: i. Crop growth and dry
 530 matter partitioning. **Crop Science**, v.34, p.1039-1043, 1994. DOI:
 531 <https://doi.org/10.2135/cropsci1994.0011183X003400040037x>

532

533 COLOMB, B.; KINIRY, J. R.; DEBAEKE, P. Effect of soil phosphorus on leaf development
 534 and senescence dynamics of field-grown maize. **Agronomy Journal**, v.92, p.428-435, 2000.
 535 DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2000.923428x>

536

537 EDMEADEST, G. O. ;DAYNARD, T. B. The relationship between final yield and
 538 photosynthesis at flowering in individual maize plants. **Canadian Journal of Plant Science**,
 539 v.59, p.585-601, 1979. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjps79-097>

540

541 FERREIRA, A. S.; ZUCARELI, C.; WERNER, F.; FONSECA, I. C. DE B.; JUNIOR, A. A.
 542 B. Minimum optimal seeding rate for indeterminate soybean cultivars grown in the tropics.
 543 **Agronomy Journal**, v.112, p.2092-2102, 2020. DOI: [10.1002/agj2.20188](https://doi.org/10.1002/agj2.20188)

- 544
545 FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M., et al. Modelo para estimativa do índice de área foliar da
546 cultura de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.4, p.8-13, 2005.
- 547
548 FISCHER, R. A.; MORENO RAMOS, O. H.; ORTIZ MONASTERIO, I.; SAYRE, K. D. Yield
549 response to plant density, row spacing and raised beds in low latitude spring wheat with ample
550 soil resources: An update. **Field Crops Research**, v.232, p.95-105, 2019. DOI:
551 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.12.011>
- 552
553 FRENCH, R.J., SCHULTZ, J.E.. Water use efficiency of wheat in a 473 Mediterranean-type
554 environment. I. The relation between yield, water use 474 and climate. **Australian Journal of**
555 **Agricultural Research**, V.35, p.743–764. 1984. DOI: <https://doi.org/10.1071/AR9840743>
- 556
557 HASHEMI, A. M. ; HERBERT, S. J. ; PUTNAM, D. H. Yield response of corn to crowding
558 stress. **Agronomy Journal**, v.97, p.839-846, 2005. DOI:
559 <https://doi.org/10.2134/agronj2003.0241>
- 560
561 KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do estado do Rio Grande do Sul segundo a
562 classificação climática de köppen e thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, v. 2, n., p. 171-182,
563 2001. DOI: <https://doi.org/10.37779/nt.v2i1.1136>
- 564
565 LI, J.; XIE, R. Z.; WANG, K. R.; MING, B.; GUO, Y. Q.; ZHANG, G. Q.; LI, S. K. Variations
566 in maize dry matter, harvest index, and grain yield with plant density. **Agronomy Journal**,
567 v.107, n.3, p.829-834, 2015. DOI: 10.2134/agronj14.0522
- 568
569 LINDQUIST, J. L.; ARKEBAUER, T. J.; WALTERS, D. T.; CASSMAN, K. G.;
570 DOBERMANN, A. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions.
571 **Agronomy Journal**, v.97, n., p.72-78, 2005. DOI: 10.2134/agronj2005.0072
- 572
573 LINDSEY, A. J. ;THOMISON, P. R. Drought-tolerant corn hybrid and relative maturity yield
574 response to plant population and planting date. **Agronomy Journal**, v.108, n.1, p.229-242,
575 2016. DOI:10.2134/agronj2015.0200
- 576
577 LIU, G.; HOU, P.; XIE, R.; MING, B.; WANG, K.; XU, W.; LIU, W.; YANG, Y.; LI, S.
578 Canopy characteristics of high-yield maize with yield potential of 22.5 Mg ha⁻¹. **Field Crops**
579 **Research**, v.213, p.221-230, 2017. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.08.011
- 580
581 LIU, W.;TOLLENAAR, M. Response of yield heterosis to increasing plant density in maize.
582 **Crop Science**, v.49, n.5, p.1807-1816, 2009. DOI: 10.2135/cropsci2008.07.0422
- 583
584 MILANDER, J. J.; JUKIC, Z.; MASON, S. C.; GLAUSHA, T.; KMAIL, Z. Plant population
585 influence on maize yield components in croatia and nebraska. **Crop Science**, v.56, n.5, p.2742-
586 2750, 2016. DOI: 10.2135/cropsci2015.09.0565
- 587
588 MONNEVEUX, P.; ZAIDI, P. H.; SANCHEZ, C. Population density and low nitrogen affects
589 yield-associated traits in tropical maize. **Crop Science**, v.45, n., p.535-545, 2005. DOI:
590 10.2135/cropsci2005.0535
- 591

- 592 MUELLER, N. D.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.; RAY, D. K.; RAMANKUTTY, N.;
 593 FOLEY, J. A. Closing yield gaps through nutrient and water management. **Nature**, v. 490, n.
 594 7419, p. 254–257, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature11420>
 595
- 596 MÜLLER, A. G.; Homero Bergamaschi, H.; Bergonci, J. I.; Radin, B.; França, S.; da Silva, M.
 597 I. G. Estimativa do índice de área foliar do milho a partir da soma de graus-dia. **Revista**
 598 **Brasileira de Agrometeorologia**, v.13, n., p.65-71, 2005.
 599
- 600 NORWOOD, C. A. Dryland corn in western kansas: effects of hybrid maturity, planting date,
 601 and plant population. **Agronomy Journal**, v.93, n., p.540–547, 2001. DOI:
 602 <https://doi.org/10.2134/agronj2001.933540x>
 603
- 604 NOVACEK, M. J.; MASON, S. C.; GALUSHA, T. D.; YASEEN, M. Twin rows minimally
 605 impact irrigated maize yield, morphology, and lodging. **Agronomy Journal**, v.105, n.1, p.268-
 606 276, 2013. DOI: [10.2134/agronj2012.0301](https://doi.org/10.2134/agronj2012.0301)
 607
- 608 NOVACEK, M. J.; MASON, S.C.; GALUSHA, T.D.; YASEEN, M. Bt transgenes minimally
 609 influence maize grain yields and lodging across plant populations. **Maydica**, v.59, n., p.90–95,
 610 2014. DOI:
 611
- 612 PEDERSEN, P.; LAUER, J. G. Influence of rotation sequence on the optimum corn and
 613 soybean plant population. **Agronomy Journal**, v.94, n., p.968–974, 2002. DOI:
 614 <https://doi.org/10.2134/agronj2002.9680>
 615
- 616 PONELEIT, C. G.; EGLI, D. B. Kernel growth rate and duration in maize as affected by plant
 617 density and genotype. **Crop Science**, v.19, n., p.385–388, 1979. DOI:
 618 <https://doi.org/10.2135/cropsci1979.0011183X001900030027x>
 619
- 620 RIBAS, G. G.; ZANON, A. J.; STRECK, N. N.; PILECCO, I. I.; DE SOUZA, P. M;
 621 HEINEMANN, A. B.; GRASSINI, P. Assessing yield and economic impact of introducing
 622 soybean to the lowland rice system in southern Brazil. **Agricultural Systems**, v.188, p.1-10,
 623 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103036>.
 624
- 625 RIBEIRO, B. S. M. R.; ZANON, A.J.; STRECK, N.A.; FRIEDRICH, E.D.; PILECCO, I.B.;
 626 ALVES, A.F.; PUNTEL, S.; SARMENTO, L.F.V.; STRECK, I.L.; INKLMAN, V.B.; PETRY,
 627 M.T.; MARTINS, J.D.; BORTOLUZZI, M.P; LOOSE, L. H.; BRUNETTO, G. MARIN, F.R.;
 628 ANTOLIN, L.A.S.; BREDEMEIER, C.; VIAN, A. L.; OLIVEIRA, L.F.R **Ecofisiologia do**
 629 **Milho Visando Altas Produtividades**. 1.ed. Santa Maria, RS. 2020. 230p.
 630
- 631 RITCHIE, S. W. ;HANWAY, J. J. ;BENSON, G. **How a Corn Plant Develops** 1993.
 632
- 633 SALVAGIOTTI, F.; CASSMAN, K. G.; SPECHT, J. E.; WALTERS, D. T.; WEISS, A.;
 634 DOBERMANN, A. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A
 635 review. **Field Crops Research**, v.108, n.1, p.1-13, 2008. DOI: [:10.1016/j.fcr.2008.03.001](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.03.001)
 636
- 637 SANGOI, L. Understanding plant density effects on maize growth and development: An
 638 important issue to maximize grain yield. **Ciencia Rural**, v.31, n., p.159–168, 2001. DOI:
 639 [10.1590/s0103-84782001000100027](https://doi.org/10.1590/s0103-84782001000100027)
 640

- 641 SANTOS HANSEL, D. S.; SCHWALBERT, R. A.; SHOUP, D. E.; HOLSHOUSER, D. L.;
 642 PARVEJ, R.; PRASAD, P. V. V.; CIAMPITTI, I. A. A review of soybean yield when double-
 643 cropped after wheat. **Agronomy Journal**, v.111, n.2, p.677-685, 2019. DOI:
 644 10.2134/agronj2018.06.0371
- 645
 646 SARLANGUE, T.; ANDRADE, F. H.; CALVIÑO, P. A.; PURCELL, L. C. Why do maize
 647 hybrids respond differently to variations in plant density? **Agronomy Journal**, v.99, n.4, p.984-
 648 991, 2007. DOI:10.2134/agronj2006.0205
- 649
 650 SCHWALBERT, R.; AMADO, T. J. C.; HORBE, T. A. N.; STEFANELLO, L. O.; ASSEFA,
 651 Y.; PRASAD, P. V. V.; RICE, C.R.; CIAMPITTI, I. A. Corn yield response to plant density
 652 and nitrogen: spatial models and yield distribution. **Agronomy Journal**, v.110, n.3, p.970-982,
 653 2018. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2017.07.0425>
- 654
 655 TAGLIAPIETRA, E. L., STRECK, N. A., DA ROCHA, T. S. M., RICHTER, G. L., DA
 656 SILVA, M. R., CERA, J. C., GUEDES, J. V. C.; ZANON, A. J. Optimum leaf area index to
 657 reach soybean yield potential in subtropical environment **Agronomy Journal**, v. 110, p.932-
 658 938, 2018. DOI: 10.2134/agronj2017.09.0523
- 659
 660 TAGLIAPIETRA, E. L.; ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; BALEST, D. S.; DA ROSA, S. L;
 661 BEXAIRA, K. P.; RICHTER, G. L.; RIBAS, G. G.; DA SILVA, M. R. Biophysical and
 662 management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. **Agronomy**
 663 **Journal**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20586>
- 664
 665 TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J.; BEFORT, B.L.; Global food demand and the sustainable
 666 intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the**
 667 **United States of America**, v.108, n., p.20260–20264, 2011. DOI:
 668 <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- 669
 670 TOKATLIDIS, I. S.; HAS, V.; MELIDIS, V.; HAS, I.; MYLONAS, I.; EVGENIDIS, G.;
 671 COPANDEAN, A.; NINO, E.; FASOULA, V. A. Maize hybrids less dependent on high plant
 672 densities improve resource-use efficiency in rainfed and irrigated conditions. **Field Crops**
 673 **Research**, v.120, n.3, p.345-351, 2011. DOI:10.1016/j.fcr.2010.11.006
- 674
 675 TOKATLIDIS, I. S. Adapting maize crop to climate change. **Agronomy for Sustainable**
 676 **Development**, v.33, n.1, p.63-79, 2013. DOI: 10.1007/s13593-012-0108-7 DOI:
 677 10.1007/s13593-012-0108-7
- 678
 679 TOLLENAAR, M. ;LEE, E. A. Yield potential, yield stability, and stress tolerance in maize.
 680 **Field Crops Research**, v. 75, n., p.161–169, 2002. DOI: 10.1016/s0378-4290(02)00024-2
- 681
 682 TSIMBA, R.; EDMEADES, G. O.; MILLNER, J. P.; KEMP, P. D. The effect of planting date
 683 on maize: Phenology, thermal time durations and growth rates in a cool temperate climate.
 684 **Field Crops Research**, v.150, n., p.145-155, 2013. DOI:10.1016/j.fcr.2013.05.021
- 685
 686 VAN ITTERSUM, M. K.; CASSMAN, K. G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.;
 687 HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. **Field Crops**
 688 **Research**, v.143, n., p.4-17, 2013. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.09.009
- 689

- 690 XU, W.; LIU, C.; WANG, K.; XIE, R.; MING, B.; WANG, Y.; GUOQIANG ZHANGA, G.;
691 LIUB, G.; ZHAOC, R.; FANB, P.; LIA, S.; HOU, P. Adjusting maize plant density to different
692 climatic conditions across a large longitudinal distance in China. **Field Crops Research**, v.212,
693 n., p.126-134, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.006>
694
- 695 YANG, H.; DOBERMANN, A.; CASSMAN, K. G.; WALTERS, D. T. Features, applications,
696 and limitations of the hybrid-maize simulation model. **Agronomy Journal**, v.98, n.3, p.737-
697 748, 2006. DOI:10.2134/agronj2005.0162
698
- 699 YANG, H. S.; DOBERMANN, A., LINDQUIST, J. L.; WALTERS, D. T.; ARKEBAUER, T.
700 J.; CASSMAN, K. G. Hybrid-maize—a maize simulation model that combines two crop
701 modeling approaches. **Field Crops Research**, v.87, n.2-3, p.131-154, 2004.
702 DOI:10.1016/j.fcr.2003.10.003
703
- 704 ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; & GRASSINI, P. Climate and management factors
705 influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, v.108,
706 p.1447–1454, 2016. DOI: 10.2134/agronj2015.0535

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do presente estudo, foi possível demonstrar o efeito da densidade de plantas sobre os componentes de rendimento em ambientes distintos, havendo a maior penalização em ambientes de baixa produtividade com o aumento da densidade, sendo mais afetado o número de grãos por fileira.

A densidade agronômica ótima variou entre ambientes de produção, sendo diretamente influenciada pela disponibilidade de recursos, desta forma, deve-se avaliar criteriosamente a capacidade do ambiente em suportar uma densidade de plantas, visto que maximiza a produtividade, a eficiência no uso de recursos e o lucro do produtor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUSTIANI, N., et al. Simulating rice and maize yield potential in the humid tropical environment of Indonesia. **European Journal of Agronomy**, v.101, p.10-19, 2018.
- ARGENTA, G. ;SILVA, P. R. F. d. ;SANGOI, L. ARRANJO DE PLANTAS EM MILHO: ANÁLISE DO ESTADO-DA-ARTE. **Ciencia Rural**, v.31, n., p.1075-1084, 2001.
- ASSEFA, Y., et al. Yield Responses to Planting Density for US Modern Corn Hybrids: A Synthesis-Analysis. **Crop Science**, v.56, n.5, p.2802-2817, 2016.
- ASSEFA, Y., et al. Analysis of Long Term Study Indicates Both Agronomic Optimal Plant Density and Increase Maize Yield per Plant Contributed to Yield Gain. **Sci Rep**, v.8, n.1, p.4937, 2018a.
- ASSEFA, Y., et al. Major Management Factors Determining Spring and Winter Canola Yield in North America. **Crop Science**, v.58, n.1, p.1-16, 2018b.
- BALBOA, G. R., et al., A systems-level yield gap assessment of maize-soybean rotation under high- and low-management inputs in the Western US Corn Belt using APSIM. **Agricultural Systems**, v.174, n., p.145-154, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.04.008>
- BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O Milho e o Clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84p.
- CARCIOCHI, W. D., et al. Soybean Seed Yield Response to Plant Density by Yield Environment in North America. **Agronomy Journal**, v.111, p.1923-1932, 2019.
- CASSMAN, K. G., et al. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. **Annual Review of Environment and Resources**, v.28, n.1, p.315-358, 2003.
- CICCHINO, M., et al. Heat Stress in Field-Grown Maize: Response of Physiological Determinants of Grain Yield. **Crop Science**, v.50, n.4, p.1438-1448, 2010.
- CIRILO, A. G. ;ANDRADE, F. H. Sowing Date and Maize Productivity: I. Crop Growth and Dry Matter Partitioning. **Crop Science**, v.34, n., p.1039-1043, 1994.
- COLOMB, B. ;KINIRY, J. R. ;DEBAEKE, P. Effect of soil phosphorus on leaf development and senescence dynamics of field-grown maize. **Agronomy Journal**, v.92, n., p.428-435, 2000.
- CORASSA, G. M., et al. Optimum Soybean Seeding Rates by Yield Environment in Southern Brazil. **Agronomy Journal**, v.110, n.6, p.2430-2438, 2018.
- DUVICK, D. N. GENETIC PROGRESS IN YIELD OF UNITED STATES MAIZE (*Zea mays* L.). **Maydica**, v.50, n., p.193-202, 2005.

ECHARTE, L., et al. Response of maize kernel number to plant density in Argentinean hybrids released between 1965 and 1993. **Field Crops Research**, v.68, n., p.1-8, 2000.

ECHARTE, L. ;ROTHSTEIN, S. ;TOLLENAAR, M. The Response of Leaf Photosynthesis and Dry Matter Accumulation to Nitrogen Supply in an Older and a Newer Maize Hybrid. **Crop Science**, v.48, n.2, p.656-665, 2008.

EDMEADEST, G. O. ;DAYNARD, T. B. THE RELATIONSHIP BETWEEN FINAL YIELD AND PHOTOSYNTHESIS AT FLOWERING IN INDIVIDUAL MAIZE PLANTS. **Canadian Journal of Plant Science**, v.59, n., p.585-601, 1979.

EVANS, L. T. **Crop Evolution, adaptation and yield**. Cambridge University Press, 1993.

EWERT, F., et al. Scale changes and model linking methods for integrated assessment of agri-environmental systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.142, n.1-2, p.6-17, 2011.

FERREIRA, A. S., et al. Minimum optimal seeding rate for indeterminate soybean cultivars grown in the tropics. **Agronomy Journal**, v.112, n.3, p.2092-2102, 2020.

FAOSTAT Database – Produção Agrícola (FAO). Disponível em: <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 27 de janeiro 2021.

FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M., et al. Modelo para Estimativa do Índice de Área Foliar da Cultura de Milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.4, n.1, p.8-13, 2005.

FISCHER, R. A., et al. Yield response to plant density, row spacing and raised beds in low latitude spring wheat with ample soil resources: An update. **Field Crops Research**, v.232, n., p.95-105, 2019.

FRENCH, R.J., SCHULTZ, J.E.. Water use efficiency of wheat in a 473 Mediterranean-type environment. I. The relation between yield, water use 474 and climate. **Australian Journal of Agricultural Research**, V.35, p.743–764. 1984. DOI: <https://doi.org/10.1071/AR9840743>

HARTKAMP, A. D., et al. **Maize Production Environments Revisited: A GIS-based Approach**. 2000.

HASHEMI, A. M. ;HERBERT, S. J. ;PUTNAM, D. H. Yield Response of Corn to Crowding Stress. **Agronomy Journal**, v.97, n.3, p.839-846, 2005.

HERTEL, T. W. The Global Supply and Demand for Agricultural Land in 2050: A Perfect Storm in the Making? 1. **American Journal of Agricultural Economics**, v.93, n.2, p.259-275, 2011.

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

LI, J., et al. Variations in Maize Dry Matter, Harvest Index, and Grain Yield with Plant Density. **Agronomy Journal**, v.107, n.3, p.829-834, 2015.

- LINDQUIST, J. L., et al. Maize Radiation Use Efficiency under Optimal Growth Conditions. **Agronomy Journal**, v.97, n., p.72-78, 2005.
- LINDSEY, A. J. ;THOMISON, P. R. Drought-Tolerant Corn Hybrid and Relative Maturity Yield Response to Plant Population and Planting Date. **Agronomy Journal**, v.108, n.1, p.229-242, 2016.
- LIU, G., et al. Canopy characteristics of high-yield maize with yield potential of 22.5 Mg ha⁻¹. **Field Crops Research**, v.213, n., p.221-230, 2017.
- LIU, W. ;TOLLENAAR, M. Response of Yield Heterosis to Increasing Plant Density in Maize. **Crop Science**, v.49, n.5, p.1807-1816, 2009.
- LÖFFLER, C. M., et al. Classification of Maize Environments Using Crop Simulation and Geographic Information Systems. **Crop Science**, v.45, n.5, p.1708-1716, 2005.
- LOOMIS, R. S. ;AMTHOR, J. S. Yield Potential, Plant Assimilatory Capacity, and Metabolic Efficiencies. **Crop Science**, v.39, n., p.1584-1596, 1999.
- MADDONNI, G. A. ;OTEGUI, M. E. Leaf area, light interception, and crop development in maize. **Field Crops Research**, v.48, n., p.81-87, 1996.
- MILANDER, J. J., et al. Plant Population Influence on Maize Yield Components in Croatia and Nebraska. **Crop Science**, v.56, n.5, p.2742-2750, 2016.
- MONNEVEUX, P. ;ZAIDI, P. H. ;SANCHEZ, C. Population Density and Low Nitrogen Affects Yield-Associated Traits in Tropical Maize. **Crop Science**, v.45, n., p.535-545, 2005.
- MUELLER, N. D. et al. Closing yield gaps through nutrient and water management. **Nature**, v. 490, n. 7419, p. 254–257, 2012.
- MÜLLER, A. G., et al. Estimativa do índice de área foliar do milho a partir da soma de graus-dia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.13, n., p.65-71, 2005.
- MYLONAS, I., et al. Improved plant yield efficiency alleviates the erratic optimum density in maize. **Agronomy Journal**, v.112, n.3, p.1690-1701, 2020.
- NORWOOD, C. A. Dryland Corn in Western Kansas: Effects of Hybrid Maturity, Planting Date, and Plant Population. **Agronomy Journal**, v.93, n., p.540–547, 2001.
- NOVACEK, M. J., et al. Twin Rows Minimally Impact Irrigated Maize Yield, Morphology, and Lodging. **Agronomy Journal**, v.105, n.1, p.268-276, 2013.
- NOVACEK, M. J., et al. Bt transgenes minimally influence maize grain yields and lodging across plant populations. **Maydica**, v.59, n., p.90–95, 2014.
- OTTMAN, M. J. ;WELCH, L. F. Planting Patterns and Radiation Interception, Plant Nutrient Concentration, and Yield in Corn. **Agronomy Journal**, v.81, n., p.167-184, 1989.

PEDERSEN, P. ;LAUER, J. G. Influence of Rotation Sequence on the Optimum Corn and Soybean Plant Population. **Agronomy Journal**, v.94, n., p.968–974, 2002.

PONELEIT, C. G. ;EGLI, D. B. Kernel Growth Rate and Duration in Maize as Affected by Plant Density and Genotype. **Crop Science**, v.19, n., p.385–388, 1979.

RIBAS, G. G., et al. Assessing yield and economic impact of introducing soybean to the lowland rice system in southern Brazil. **Agricultural Systems**, v.188, p.1-10, 2021.

RIBEIRO, B. S. M. R., et al. **Ecofisiologia do Milho Visando Altas Produtividades**. 1.ed. Santa Maria, RS. 2020. 230p.

RITCHIE, S. W. ;HANWAY, J. J. ;BENSON, G. **How a Corn Plant Develops** 1993.

RUFFO, M. L., et al. Evaluating Management Factor Contributions to Reduce Corn Yield Gaps. **Agronomy Journal**, v.107, n.2, p.495-505, 2015.

SALVAGIOTTI, F., et al. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. **Field Crops Research**, v.108, n.1, p.1-13, 2008.

SANGOI, L. Understanding plant density effects on maize growth and development: An important issue to maximize grain yield. **Ciencia Rural**, v.31, n., p.159–168, 2001.

SANTOS HANSEL, D. S., et al. A Review of Soybean Yield when Double-Cropped after Wheat. **Agronomy Journal**, v.111, n.2, p.677-685, 2019.

SARLANGUE, T., et al. Why Do Maize Hybrids Respond Differently to Variations in Plant Density? **Agronomy Journal**, v.99, n.4, p.984-991, 2007.

SCHWALBERT, R., et al. Corn Yield Response to Plant Density and Nitrogen: Spatial Models and Yield Distribution. **Agronomy Journal**, v.110, n.3, p.970-982, 2018.

TAGLIAPIETRA, E. L. et al. Optimum Leaf Area Index to Reach Soybean Yield Potential in Subtropical Environment **Agronomy Journal**, v. 110, p.932–938, 2018.

TAGLIAPIETRA, E. L.; et al. Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of brazil. **Agronomy Journal**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20586>

TETIO-KAGHO, F. ;GARDNER, F. P. Responses of Maize to Plant Population Density. I. Canopy Development, Light Relationships, and Vegetative Growth. **Agronomy Journal**, v.80, n., p.930-935, 1988.

TILMAN, D., et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.108, n., p.20260–20264, 2011.

TOKATLIDIS, I. S., et al. Maize hybrids less dependent on high plant densities improve resource-use efficiency in rainfed and irrigated conditions. **Field Crops Research**, v.120, n.3, p.345-351, 2011.

TOKATLIDIS, I. S. Adapting maize crop to climate change. **Agronomy for Sustainable Development**, v.33, n.1, p.63-79, 2013.

TOLLENAAR, M. ;LEE, E. A. Yield potential, yield stability, and stress tolerance in maize. . **Field Crops Research**, v. 75, n., p.161–169, 2002.

TSIMBA, R., et al. The effect of planting date on maize: Phenology, thermal time durations and growth rates in a cool temperate climate. **Field Crops Research**, v.150, n., p.145-155, 2013.

VALENTINUZ, O. R. ;TOLLENAAR, M. Vertical Profile of Leaf Senescence during the Grain-FillingPeriod in Older and Newer Maize Hybrids. **Crop Science**, v.44, n., p.827-834, 2004.

VAN ITTERSUM, M. K. ;RABBINGE, R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. **Field Crops Research**, v.52, n., p.197-208, 1997.

VAN ITTERSUM, M. K., et al. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. **Field Crops Research**, v.143, n., p.4-17, 2013.

WESTGATE, M. E., et al. Rapid canopy closure for maize production in the northern US corn belt: Radiation-use efficiency and grain yield. **Field Crops Research**, v.49, n., p.249-258, 1997.

XU, W., et al. Adjusting maize plant density to different climatic conditions across a large longitudinal distance in China. **Field Crops Research**, v.212, n., p.126-134, 2017.

YANG, H., et al. Features, Applications, and Limitations of the Hybrid-Maize Simulation Model. **Agronomy Journal**, v.98, n.3, p.737-748, 2006.

YANG, H., et al. Improvements to the Hybrid-Maize model for simulating maize yields in harsh rainfed environments. **Field Crops Research**, v.204, n., p.180-190, 2017.

YANG, H. S. et al. Hybrid-maize—a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. **Field Crops Research**, v.87, n.2-3, p.131-154, 2004.

ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; & GRASSINI, P. Climate and Management Factors Influence Soybean Yield Potential in a Subtropical Environment. **Agronomy Journal**, v.108, p.1447–1454, 2016.