

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIA, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
CURSO DE BACHARELADO EM AGRONOMIA

RAFAEL ERICK LOS

PLANTAS DE MILHO E ADUBAÇÃO EM FUNÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO,
SAFRA 2024-2025

PONTA GROSSA
2025

RAFAEL ERICK LOS

PLANTAS DE MILHO E ADUBAÇÃO EM FUNÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO,
SAFRA 2024-2025

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual de Ponta Grossa como
requisito para obtenção do Título de
Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Cláudio Garcia

PONTA GROSSA

2025



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
COLEGIADO DO CURSO DE AGRONOMIA
COORDENAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

OTCC - Ano 2025

AVALIAÇÃO DE TCC RELATÓRIO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Monografia:	Plantas de milho de adubação em função de fertilidade do solo 2024 - 2025		
Autor (a):	Rafael Erick dos		
Data da defesa:	19/05/2025	Horário:	8:15
		Local:	F13

Avaliadores:	
1-Orientador (a):	Luiz Claudio Garcia
Assinatura:	
2-Avaliador (a):	Lucas A. M. Dubois
Assinatura:	
3-Avaliador (a):	Pedro H. W. Neto
Assinatura:	

Itens a serem avaliados	Notas atribuídas		
	Orientador(a)	1º Avaliador(a)	2º Avaliador(a)
I- Apresentação oral (Até 2,0)	2,0	2,0	2,6
II- Trabalho escrito (Até 6,0)	5,0	5,0	5,6
III- Arguição (Até 2,0)	2,0	2,0	4,9
TOTAL	9,0	9,0	9,1
MÉDIA FINAL *	9,0		

* Orientador(a) nota final com uma casa após a vírgula

Atenção Professor(a) ORIENTADOR(A):

No caso de apresentação de trabalho, em evento técnico-científico, no qual o acadêmico conste como autor, poderá ser acrescentado ATÉ 10% da nota, na somatória final. Apresentar comprovante junto com os documentos entregues para a Coordenação de TCC.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força e os meios necessários para a realização deste trabalho.

À minha família, pelo apoio em todas as etapas da minha graduação, por me oferecerem suporte e motivação para que eu pudesse realizar meus sonhos.

Ao professor Luiz Cláudio Garcia, pela orientação, comprometimento e paciência dedicadas ao longo da realização deste trabalho, que contribuíram de maneira significativa para minha qualificação profissional.

Aos professores do curso de Agronomia da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pelos ensinamentos transmitidos ao longo da graduação.

À Sólida AgroconsultoriaTM, pela oportunidade de realizar este experimento, pelos ensinamentos, direcionamentos e apoio na realização do experimento.

Ao produtor Renato Haroldo Geus, por ceder sua propriedade, assim como os insumos, maquinários e mão de obra para a realização do experimento.

Aos integrantes da banca examinadora, pela valiosa avaliação e por contribuírem nesta etapa final do curso.

Por fim, à Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela oportunidade de realizar o curso de Agronomia.

RESUMO

LOS, R. E. **PLANTAS DE MILHO E ADUBAÇÃO EM FUNÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO, SAFRA 2024-2025**. Orientador: Prof. Dr. Luiz Cláudio Garcia. Ponta Grossa, 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2025.

O objetivo com este experimento foi determinar o acréscimo percentual de plantas de milho (*Zea mays*) e adubação na semeadura em relação à recomendação padrão (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00), em distintos sítios de manejo - baixa, média e alta fertilidade; definidos por ferramentas da agricultura de precisão. O delineamento experimental empregado foi em blocos aleatorizados, com sete tratamentos e três repetições. Os tratamentos consistiram no acréscimo da recomendação padrão de sementes e adubo (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00 definido pelo Engenheiro Agrônomo responsável pela área) em 15, 30, 45, 60, 75, 90 e 105%. Os sete tratamentos foram aplicados nos três sítios de manejo diferenciado do solo: baixa, média e alta fertilidade. As parcelas foram de 585 m² (100 x 5,85 m) para avaliação. As variáveis analisadas foram: população inicial, organismos indesejados (plantas daninhas, pragas e doenças), acamamento, população final (espigas ha⁻¹), componentes de rendimento da cultura do milho (espigas ha⁻¹, grãos por espiga, massa de mil grãos e produtividade) e o retorno econômico. Conclui-se que as variáveis população inicial e população final apresentaram um crescimento linear. Em contrapartida, as variáveis grãos por espiga e massa de mil grãos declinaram linearmente com o acréscimo de adubo e sementes. Para a ocorrência de plantas daninhas, pragas, doenças fitopatogênicas e acamamento, não houve diferenças significativas entre os sítios de manejo. Para a produtividade final de grãos e o retorno econômico da cultura do milho, o modelo de regressão quadrática proporcionou o melhor ajuste entre os fatores avaliados. Para maximizar a produtividade, recomenda-se acrescentar 76%, 64% e 63% da recomendação padrão de sementes e adubo em áreas de baixa, média e alta fertilidade, respectivamente. Para maximizar o retorno econômico, recomenda-se elevar a recomendação padrão em 60%, 55% e 56% para os sítios de baixa, média e alta fertilidade, respectivamente.

Palavras-chave: *Zea mays*; sítios de manejo; população de plantas; agricultura de precisão.

ABSTRACT

LOS, R. E. **CORN PLANTS AND FERTILIZATION AS A FUNCTION OF SOIL FERTILITY, 2024–2025 SEASON.** Advisor: Prof. Dr. Luiz Cláudio Garcia. Ponta Grossa, 2025. Undergraduate Thesis (Bachelor's in Agronomy) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2025.

The objective of this experiment was to determine the percentage increase in corn plants (*Zea mays*) and fertilization at sowing in relation to the standard recommendation (75,000 seeds and 400 kg ha⁻¹ of NPK 18-10-00 formulation), across different management sites—low, medium, and high fertility—defined using precision agriculture tools. The experimental design used was a randomized block design, with seven treatments and three replications. The treatments consisted of increasing the standard recommendation of seeds and fertilizer (75,000 seeds and 400 kg ha⁻¹ of NPK 18-10-00 formulation, as defined by the Agronomist responsible for the area) by 15, 30, 45, 60, 75, 90, and 105%. These seven treatments were applied across the three distinct soil management sites: low, medium, and high fertility. The plots measured 585 m² (100 x 5.85 m) for evaluation. The variables analyzed were: initial plant population, undesirable organisms (weeds, pests, and diseases), lodging, final population (ears ha⁻¹), corn yield components (ears ha⁻¹, grains per ear, thousand-grain weight, and productivity), and economic return. It was concluded that initial and final plant populations showed linear growth. Conversely, grains per ear and thousand-grain weight declined linearly with the increase in seed and fertilizer rates. No significant differences were observed among the management sites regarding the occurrence of weeds, pests, phytopathogenic diseases, and lodging. For final grain yield and economic return of the corn crop, the quadratic regression model provided the best fit among the evaluated factors. To maximize productivity, it is recommended to increase the standard seed and fertilizer rate by 76%, 64%, and 63% in low, medium, and high fertility areas, respectively. To maximize economic return, the recommended increases in the standard rate are 60%, 55%, and 56% for low, medium, and high fertility sites, respectively.

Keywords: *Zea mays*; management sites; plant population; precision agriculture.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1- Recomendação de adubação nitrogenada para o cultivo de milho no Estado do Paraná, de acordo com a cultura anterior e a produtividade de grãos esperada. 22
- Tabela 2- Recomendação de adubação fosfatada para o cultivo de milho no Estado do Paraná, de acordo com a classe de disponibilidade de fósforo no solo. 23
- Tabela 3- Recomendação de adubação potássica para o cultivo de milho no Estado do Paraná, de acordo com a classe de disponibilidade de potássio no solo e a produtividade esperada. 23
- Tabela 4- Resultados das análises física do solo (0,00 a 0,20m), anterior ao cultivo do milho (*Zea mays*) em sítios de manejo diferenciado do solo (baixa, média e alta fertilidade), da fazenda Figueira / Carambeí - PR, Safra 2024-25. 26

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1- Condições do tempo no período de condução do experimento com a cultura do milho (*Zea mays*) híbrido AG9021PRO3™, safra 2024-25, com acréscimo percentual de sementes e adubação na semeadura em relação à recomendação padrão (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00), em distintos sítios de manejo do solo da Fazenda Figueira (Carambeí - PR). 30
- Figura 2- População inicial de milho (*Zea mays*), 20 dias após a emergência, híbrido AG9021PRO3™, safra 2024-25, com acréscimo percentual de sementes e adubação na semeadura em relação à recomendação padrão (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00), em distintos sítios de manejo do solo da Fazenda Figueira, Carambeí – PR, ($p < 0,05$) 31
- Figura 3- População final de milho (*Zea mays*), mensurado no estágio fenológico R6 (Magalhães; Durães, 2006), híbrido AG9021PRO3™, safra 2024-25, com acréscimo percentual de sementes e adubação na semeadura em relação à recomendação padrão (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00), em distintos sítios de manejo do solo da Fazenda Figueira, Carambeí - PR, ($p < 0,05$). 33
- Figura 4- Grãos por espiga de milho (*Zea mays*), mensurado no estágio fenológico R6 (Magalhães; Durães, 2006), híbrido AG9021PRO3™, safra 2024-25, com acréscimo percentual de sementes e adubação na semeadura em relação à recomendação padrão (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00), em distintos sítios de manejo do solo da Fazenda Figueira, Carambeí - PR, ($p < 0,05$). 35
- Figura 5- Massa de mil grãos de milho (*Zea mays*), mensurado no estágio fenológico R6 (Magalhães; Durães, 2006), híbrido AG9021PRO3™, safra 2024-25, com acréscimo percentual de sementes e adubação na semeadura em relação à recomendação padrão (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00), em distintos sítios de manejo do solo da Fazenda Figueira, Carambeí - PR, ($p < 0,05$). 36
- Figura 6- Produtividade de milho (*Zea mays*), híbrido AG9021PRO3™, safra 2024-25, com acréscimo percentual de sementes e adubação na semeadura em relação à recomendação padrão (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00), em distintos sítios de manejo do solo da Fazenda Figueira, Carambeí - PR, ($p < 0,05$). 37

Figura 7- Retorno econômico da cultura do milho (*Zea mays*), subtraindo os custos de semente e adubo na semeadura do valor da venda da produção, híbrido AG9021PRO3™, safra 2024-25, com acréscimo percentual de sementes e adubação na semeadura em relação à recomendação padrão (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00), em distintos sítios de manejo do solo da Fazenda Figueira, Carambeí - PR, ($p < 0,05$). 39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo Geral.....	12
2.2	Objetivo Específico	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	IMPORTÂNCIA DA CULTURA DO MILHO	13
3.2	POPULAÇÃO DE MILHO	14
3.3	ADUBAÇÃO NA CULTURA DO MILHO.....	19
3.3.1	Nutrição vegetal.....	19
3.3.2	Recomendação de adubação para a cultura do milho	22
3.4	SÍTIOS DE MANEJO	24
4	MATERIAL E MÉTODOS	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
6	CONCLUSÕES.....	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays*) é uma cultura de relevância global, sendo o cereal mais consumido no planeta e considerado a segunda *commodity* mais comercializada no mercado agrícola (Conab, 2024). Além disso, destaca-se devido ao seu potencial produtivo, composição química e alto valor nutricional, sendo amplamente cultivado e consumido em diferentes regiões do mundo (Rolim *et al.*, 2019). Além de seu uso na alimentação, esse cereal é utilizado como matéria-prima para a produção de uma ampla variedade de produtos (Spagnollo *et al.*, 2016). Do ponto de vista agrotecnológico, a cultura do milho vem sofrendo diversas modificações. Entre essas, destacam-se melhorias nas características agronômicas e nas práticas de manejo que, quando utilizadas de maneira adequada, têm contribuído para o aumento da produtividade e do rendimento econômico para os produtores que adotam essas práticas (Lana *et al.*, 2009).

Nesse contexto, a agricultura de precisão destaca-se como um importante aliado, sendo definida como um sistema de gerenciamento agrícola na qual a tecnologia de informação é usada no manejo da propriedade e leva em consideração a variabilidade espacial e temporal, promovendo maior eficiência no uso de insumos, redução de custos e minimização dos impactos ambientais. Esse sistema possibilita a coleta e análise detalhada de dados, o que favorece a compreensão e o gerenciamento mais preciso dos sistemas de produção agrícola (Borges *et al.*, 2022).

A aplicação dessas tecnologias permite a análise da variabilidade dos atributos do solo e de cultura, sendo designada como uma ferramenta favorável para compreender os fatores que interferem na expressão do potencial produtivo e sua variabilidade em uma área agrícola, podendo aprimorar práticas de manejo sítio-específicas, visando a maximizar o potencial produtivo em diferentes sítios de manejo da lavoura (Vian *et al.*, 2016). Dentre as estratégias, ressalta-se a modificação da população de plantas de milho que é considerada uma das práticas de manejo mais relevantes para a maximização do rendimento de grãos, possibilitando a otimização do uso dos recursos disponíveis, como água, luz e nutrientes (Kappes *et al.*, 2011).

A busca por altas produtividades exige investimento na construção da fertilidade do solo. Diante da intensa evolução agrícola e os elevados investimentos em fertilizantes, a pesquisa procura formas de viabilizar o manejo adequado da adubação (Hurtado *et al.*, 2008). Assim, o objetivo com este trabalho foi determinar a melhor relação entre a população de plantas de milho e a adubação em sítios de manejo diferenciado do solo, utilizando ferramentas de agricultura de precisão.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

2.2 Objetivo Específico

Para se responder ao objetivo geral se avaliaram as seguintes variáveis:

1. População inicial do milho;
2. Organismos indesejados (plantas daninhas, pragas e doenças);
3. Acamamento;
4. População final (espigas por ha^{-1});
5. Componentes de rendimento da cultura do milho (espigas ha^{-1} , grãos por espiga, massa de mil grãos e produtividade);
6. Retorno econômico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 IMPORTÂNCIA DA CULTURA DO MILHO

O milho (*Zea mays*) é uma planta anual, pertencente à família das Poaceae, com metabolismo fotossintético C4. O desenvolvimento da planta foi dividido em escala fenológica com estádios vegetativo e reprodutivos, para melhor entendimento, sendo a proposta realizada por Magalhães e Durães (2006). Trata-se de uma cultura amplamente cultivada em escala global, constituindo-se como um cereal de significativa relevância para o setor agropecuário, especialmente no Brasil. Ademais, o milho é uma das espécies com maior investimento em tecnologia (Bianchetto *et al.*, 2017). Nesse contexto, o milho exerce um papel fundamental na agricultura brasileira, tanto do ponto de vista econômico, em função da extensa cadeia produtiva e por ser uma *commodity* em ascensão no mercado internacional, quanto do ponto de vista agrônomo, compondo o sistema de rotação de culturas (Veloso *et al.*, 2020).

No cenário nacional, a maior parte da produção destina-se à fabricação de rações animais, enquanto aproximadamente 15% é utilizada como matéria-prima para a alimentação humana. Além disso, a cultura do milho destaca-se por sua crescente aplicação na indústria de alta tecnologia, sendo utilizado na produção de filmes, embalagens biodegradáveis e biocombustíveis, o que reforça sua importância estratégica nos setores agrícola e industrial (Oliveira-Paiva *et al.*, 2020).

Além da sua relevância econômica, o milho também exerce um papel agrônomo essencial ao ser inserido em sistemas de rotação de culturas, especialmente com a soja (*Glycine max*). A adoção da rotação com o milho contribui significativamente para a redução de incidência de podridões radiculares, além de propiciar o aumento do rendimento de grãos da soja (Reis *et al.*, 2014).

Os dados mais recentes da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2024) corroboram com essa relevância, indicando que na safra 2023/2024, o Brasil obteve uma produção de 115.697 mil Mg de milho, com uma produtividade média de 5.496 kg ha⁻¹, em uma área de 21.051 mil hectares. Especificamente no estado do Paraná, a área cultivada foi de 2.809 mil hectares, resultando em uma produção de 14.996 mil Mg e uma produtividade média de 5.339 kg ha⁻¹, reforçando a importância da cultura para a economia do país.

Diante disso, a cultura do milho está entre as que apresentaram maiores incrementos de produtividade nas últimas décadas. Isso se deve principalmente à adoção de práticas

agronômicas de manejo mais adequadas e em razão do melhoramento genético, que permitiu que a cultura se tornasse mais tolerante a altas densidades, sem diminuir drasticamente a emissão e manutenção das espigas (Calonego *et al.*, 2011).

3.2 POPULAÇÃO DE MILHO

A população de plantas refere-se ao número de indivíduos presentes em uma determinada área. Nesse contexto, o estabelecimento da população de plantas no milho é fundamental para definir seu rendimento, sendo primordial para garantir uma ótima produtividade da cultura, devido à variação genética, como altura da planta e qualidade do colmo (Passos *et al.*, 2019).

A definição da população ideal de plantas depende do cultivar, da fertilidade do solo, da disponibilidade de água e da época de semeadura (Zoz *et al.*, 2019). Desse modo, a densidade de plantas na cultura do milho configura-se como um fator crucial, uma vez que influencia diretamente a quantidade de espigas por área, podendo afetar os componentes de rendimento do cereal (Batista *et al.*, 2019).

A adequada distribuição de plantas possibilita um melhor aproveitamento de luz, água e nutrientes, o que pode resultar em maior produtividade da cultura. Diante disso, a modificação do arranjo de plantas é responsável por reduzir o tempo necessário para que a cultura intercepte o máximo de radiação solar e, em consequência, incremente a máxima quantidade de energia por unidade de área e tempo (Calonego *et al.*, 2011).

O rendimento de uma lavoura aumenta com o incremento da densidade de plantio até alcançar uma densidade ótima, a qual é determinada pelo genótipo do milho, bem como por condições externas resultantes das condições edafoclimáticas do local e pelo manejo adotado na área. A partir dessa densidade populacional ótima, o aumento da densidade populacional ocasionará a redução progressiva na produtividade da lavoura (Cruz *et al.*, 2021).

No entanto, além da obtenção da densidade populacional ótima, deve-se levar em consideração a regularidade da distribuição espacial nas linhas, tendo em vista que a irregularidade na distribuição espacial pode reduzir a eficiência do aproveitamento de água, luz e nutrientes, além de aumentar a quantidade de plantas com desenvolvimento fenológico retardado, colmos frágeis e que se apresentam enfraquecidas, produzindo espigas pequenas. Nessa perspectiva, quanto maior a população de plantas e mais elevado o teto produtivo almejado, maior será o efeito negativo da irregularidade na distribuição espacial sobre o

aproveitamento dos recursos disponíveis (Sangoi *et al.*, 2013). Da mesma forma, a irregularidade na emergência das sementes pode resultar na ocorrência de plantas dominadas, as quais apresentam menor potencial produtivo em relação às plantas que emergem de maneira uniforme (Molin *et al.*, 2010).

Diante desse cenário, Garcia *et al.* (2006) avaliaram a influência da velocidade de deslocamento durante a semeadura do milho e constataram que o aumento dessa velocidade compromete a qualidade da distribuição das sementes. Os autores observaram que a produtividade é afetada negativamente quando há redução significativa da população de plantas com espiga no momento da colheita.

Sob essa mesma ótica, ao mensurar o efeito da distribuição temporal na formação do estande de plantas, Henrichsen *et al.* (2021) concluíram que a desuniformidade de emergência na cultura do milho resulta no desenvolvimento de plantas com menor altura, redução do índice de área foliar e menor acúmulo de massa seca. Além disso, as maiores produtividades foram observadas nos tratamentos sem atrasos na emergência, com incrementos de até 14% em comparação àqueles com maior desuniformidade. Sob essa perspectiva, vale ressaltar que Sangoi *et al.* (2010a), ao avaliarem a uniformidade no desenvolvimento e a resposta de cultivares de milho ao acréscimo da população de plantas, constataram que o aumento da densidade populacional resultou em maior variabilidade entre plantas, evidenciada por características morfológicas e fisiológicas da cultura.

Por conseguinte, torna-se pertinente reavaliar as recomendações de espaçamento e densidade de semeadura para a cultura do milho, devido às modificações introduzidas nos genótipos mais recentes, tendo como exemplo pendões menores, lâminas foliares com menores ângulos em relação ao colmo, colmos com maior tolerância ao quebramento e às podridões, plantas mais resistentes ao acamamento. Tais características conferem aos cultivares modernos uma maior tolerância ao adensamento de plantas (Galvão *et al.*, 2014). Ademais, o desenvolvimento de cultivares mais precoces, com menor estatura de plantas, com folhas mais eretas e dossel mais compacto tem viabilizado o aumento da população de plantas nas lavouras de milho do Brasil (Foloni *et al.*, 2015).

Desse modo, diversos pesquisadores consideram o próprio genótipo como o principal fator determinante para a densidade de plantas na cultura do milho (Takasu *et al.*, 2013). Nessa perspectiva, a cada ano que passa, os programas de melhoramento genético de milho buscam por genótipos de milho cujas máximas produtividades são atingidas em densidades

populacionais superiores às densidades populacionais utilizadas convencionalmente, situando-se entre 70.000 e 100.000 plantas por hectare (Farinelli *et al.*, 2012).

De modo geral, as cultivares de ciclo mais curto necessitam de maior densidade de plantio em relação às cultivares tardias para atingir o seu máximo potencial produtivo. Isso se deve ao fato de que as cultivares mais precoces tendem a apresentar plantas menores e com menor massa vegetativa, resultando em um menor sombreamento dentro da cultura e proporcionando um menor espaço entre plantas para um melhor aproveitamento da radiação solar (Cruz *et al.*, 2021).

O milho, diferentemente de outras poáceas, não possui um mecanismo eficiente de compensação de espaços, dado que seu perfilhamento é escasso e pouco efetivo, e sua capacidade de expansão foliar é limitada. Dessa forma, o aumento na densidade de plantas é uma maneira para maximizar a interceptação da radiação solar e o rendimento de grãos (Boiago *et al.*, 2017). Por não apresentar a plasticidade morfológica observada em outras culturas para compensar a ausência de plantas, o milho depende diretamente do estande de plantas e da produção individual por planta como principais componentes da produtividade. Assim, uma vez estabelecida a lavoura, a produção por planta torna-se o fator determinante do rendimento final (Silva *et al.*, 2016).

A eficácia do aumento da densidade de plantas de milho está condicionada a diversos fatores, como a disponibilidade hídrica, a altitude e latitude da região, a época de semeadura, a capacidade de investimento em manejo, o espaçamento entre linhas, o nível de fertilidade do solo e o híbrido de milho (Silva *et al.*, 2010). Desse modo, a eficiência da elevação da densidade populacional é maior quando se utilizam híbridos simples de alto teto produtivo, com alta disponibilidade de radiação solar, sem restrições edafoclimáticas, elevada amplitude térmica e com espaçamentos entre linhas reduzidos (Sangoi *et al.*, 2019).

A adoção de baixas densidades populacionais compromete a eficiência na interceptação da radiação solar. Embora esse manejo favoreça o aumento da produção de grãos por planta, resulta em menor produtividade por unidade de área (Calonego *et al.*, 2011). Além disso, a utilização de densidades populacionais abaixo do ideal intensifica a competição interespecífica com plantas daninhas, comprometendo o desenvolvimento da cultura (Balbinot Júnior *et al.*, 2011).

Entretanto, o aumento excessivo da densidade de plantas pode reduzir a capacidade fotossintética da cultura e a eficiência de conversão dos fotoassimilados em produção de grãos, favorecendo a ocorrência de esterilidade feminina, ampliando o intervalo entre o florescimento

masculino e feminino, e reduzindo o número de grãos produzidos por espiga e por área, conforme informado por Sangoi *et al.* (2010b). Além disso, a alta densidade de plantas podem induzir à dominância de uma planta sobre a outra, o que pode ocasionar a não formação de espiga na planta dominada (Batista *et al.*, 2019). Do mesmo modo, a intensificação da competição interespecífica também estimula modificações no desenvolvimento da planta e na arquitetura foliar, como a alongação dos entrenós, a produção de colmos de menor diâmetro e mais longos, além de aumentar a altura de inserção das espigas e a dominância apical (Sangoi *et al.*, 2019).

O aumento da densidade populacional promove a dominância apical, em razão de a luz atingir menos o ponto de crescimento da planta e degradar menos auxinas, as quais são responsáveis por estimular a alongação e divisão celular, formando, assim, plantas mais altas e com maior altura de inserção de espigas (Zucareli *et al.*, 2019). Do mesmo modo, a maior competição intraespecífica pela radiação solar e nutrientes no solo também influencia diretamente a massa de mil grãos, resultando na formação de espigas menores e no surgimento de grãos menores e, conseqüentemente, à redução da massa total de grãos colhidos (Vitorazzi *et al.*, 2017).

Nesse contexto, ao avaliarem a eficiência fotossintética e produtiva de milho em função de épocas de semeadura e populações de plantas, Santos *et al.* (2018) concluíram que a elevação da densidade populacional ocasionou um decréscimo linear no diâmetro do colmo, em decorrência do fato de que as maiores populações condicionam o desenvolvimento de plantas mais altas, pois apresentam um crescimento rápido para evitar o sombreamento e se sobressair no dossel, comprometendo o desenvolvimento do diâmetro do colmo. Todas essas características são responsáveis por promover um maior acamamento e uma maior quebra de colmos durante a colheita.

Além disso, a alta densidade pode favorecer a formação de um microclima mais propício à infecção por fungos fitopatogênicos, devido à menor circulação de ar, à redução na incidência de radiação solar nos estratos inferiores, ao prolongamento do período de deposição de orvalho e à maior competição intraespecífica pelos recursos do ambiente (Casa *et al.*, 2007).

Dentro desse panorama, ao averiguar a incidência de podridões do colmo e a qualidade de grãos de milho cultivados sob diferentes arranjos espaciais, Spagnollo *et al.* (2016) encontraram maior ocorrência de podridões da base do colmo para o híbrido de milho DKB 240 com o incremento da população de plantas. Contudo, a incidência de grãos ardidos e de *Fusarium verticillioides*, *Fusarium graminearum* e *Stenocarpella maydis* em grãos de milho

não foi influenciada pelo arranjo espacial e densidade de plantas de milho, evidenciando a influência da densidade populacional na sanidade da cultura.

Além de impactar a sanidade da cultura, a densidade populacional também interfere diretamente em características produtivas do milho. O número de espigas por planta, o tamanho da espiga, o número de grãos por espiga, a altura de inserção da espiga, o número de fileiras de grãos, a massa de grãos e a massa fresca de espigas comercializáveis são influenciados pela população de plantas (Vieira *et al.*, 2010). Sob essa perspectiva, observa-se que o aumento da densidade populacional intensifica a competição intraespecífica, o que reduz a disponibilidade de carboidratos por unidade de grão durante o período de formação, favorecendo o abortamento dos grãos localizados na extremidade da espiga e, conseqüentemente, reduzindo o número de grãos por espiga (Brachtvogel *et al.*, 2009).

O aumento no número de plantas por unidade de área, até determinado limite, tende a compensar a redução do tamanho das espigas que ocorre concomitantemente. Dessa forma, os maiores rendimentos de grãos são alcançados em densidades cuja prolificidade é próxima da unidade, com espigas de tamanho suficiente para não reduzir a produtividade final de grãos (Kappes *et al.*, 2011).

Dessa forma, ao analisar a densidade populacional, espaçamento e adubação nitrogenada no milho, Zoz *et al.* (2019), verificaram que o aumento da densidade de plantas de milho resultou na redução do número de grãos por espiga, número de fileiras por espiga, massa de grãos por espiga, massa de mil grãos, comprimento de espiga, altura de inserção de espiga e produtividade final de grãos.

De maneira semelhante, Zucareli *et al.* (2019), ao verificarem a influência da densidade populacional e adubação nitrogenada em cobertura no desenvolvimento e desempenho produtivo do milho, observaram que o adensamento populacional aumenta a altura de plantas e de inserção da espiga e reduz o diâmetro do colmo, a massa da folha seca, o teor de nitrogênio na folha e nos grãos.

A otimização da densidade de semeadura para aumentar a produtividade do milho, a eficiência do uso da água e o retorno econômico na região árida do noroeste da China foi estudada por Zhang *et al.* (2022). A textura do solo era franco-arenosa. O perfil do solo continha 20 mg dm⁻³ de P e 2,3 mmolc dm⁻³ de K disponível. As densidades de semeadura foram 75, 90, 105, 120 e 135 mil sementes ha⁻¹. O tratamento com 120 mil sementes ha⁻¹ obteve o maior rendimento de grãos (21,1 Mg ha⁻¹) e retorno econômico (3.036,01 US\$ ha⁻¹) na área irrigada.

Considerando o elevado custo das sementes de híbridos de milho e o fato de que cada material genético apresenta uma limitação de produtividade associada à densidade de plantas, que não é superada em altas populações, torna-se essencial que o agricultor determine a densidade de plantas a ser utilizada, de acordo com o híbrido escolhido, a fim de evitar custos desnecessários com aquisição de sementes para maiores densidades populacionais (Batista *et al.*, 2019). Ademais, a variação da densidade populacional requer a variação no nível de adubação, em razão de que o maior número de plantas por área ocasionará uma maior retirada de nutrientes do solo (Borghetti *et al.*, 2004). Em solos com baixa disponibilidade de nitrogênio, nos quais se espera menor produtividade de grãos, recomenda-se a redução da população de plantas. Por outro lado, à medida que se eleva a densidade de plantas, são necessárias maiores doses desse nutriente (Lana *et al.*, 2009).

Dessa maneira, considerando a relevância das características incorporadas aos genótipos modernos de milho, torna-se imprescindível reavaliar as recomendações práticas de manejo aplicadas na cultura do milho, com ênfase para a distribuição adequada de plantas, atentando-se para a adubação e a fertilidade do solo.

3.3 ADUBAÇÃO NA CULTURA DO MILHO

3.3.1 Nutrição vegetal

Nutrição vegetal é o processo pelo qual as plantas absorvem e utilizam os nutrientes do solo ou de outras fontes para sustentar seu crescimento e desenvolvimento, sendo que o milho apresenta maior sensibilidade à fertilidade do solo em comparação com a soja e alta responsividade à adubação, inclusive em solos de alta fertilidade (Lacerda *et al.*, 2015). Sendo assim, a avaliação constante e a adequação da adubação são imprescindíveis para aumentar a eficiência econômica e a produtividade da cultura. Diante desse cenário, a fertilidade do solo é um dos principais responsáveis pela baixa produtividade na cultura do milho; isso se deve sobretudo, à escassez de nutrientes no solo, mas também ao uso inadequado de calagem e adubação, especialmente nitrogênio e potássio (Rodrigues *et al.*, 2014).

O potencial produtivo da cultura é determinado pela interação entre o ambiente e o genótipo, onde, de forma ampla, as cultivares correspondem a cerca de 40% da produção total, enquanto o ambiente, como solo e clima, é responsável por aproximadamente 60% da produção total (Vian *et al.*, 2016). Além disso, um perfil de solo rico em nutrientes favorece o

desenvolvimento radicular, aumentando a capacidade de exploração do solo e permitindo que a planta alcance a umidade nas camadas mais profundas. Dentre os nutrientes essenciais para as plantas, destacam-se o fósforo e o potássio, os quais desempenham papéis fundamentais no metabolismo e na eficiência produtiva das plantas. O fósforo é um nutriente essencial nos processos de liberação de energia para as reações metabólicas, desempenha papel essencial na respiração e na fotossíntese e integra composições estruturais. Por sua vez, o potássio exerce papel imprescindível no transporte de carboidratos e, em especial, na condutância estomática (Simão *et al.*, 2018).

A deficiência de fósforo compromete diversos aspectos fisiológicos das plantas, incluindo o aparecimento, a expansão e a longevidade das folhas, o que resulta em uma redução do índice de área foliar e na capacidade de interceptação da radiação solar. Como resultado, ocorre uma diminuição no rendimento final de grãos (Sichocki *et al.*, 2014).

As respostas do milho à adubação potássica destacam-se, em geral, pela antecipação do aparecimento da inflorescência feminina, uniformidade no processo de maturação, resistência do colmo, redução da incidência de acamamento e maior massa de grãos. Por outro lado, a deficiência desse nutriente no solo resulta em espigas palhentas e flexíveis, acompanhadas de um alto índice de aborto de grãos no topo da espiga, o que compromete a massa final de grãos e a produtividade (Takasu *et al.*, 2014a).

Nesse contexto, Pereira *et al.* (2009) avaliaram cinco cultivares de milho submetidas a diferentes densidades de plantas e duas doses de adubação em dois anos agrícolas. Os autores observaram que a adoção da maior dose de fertilizantes não resultou em incrementos significativos na produtividade de grãos, entretanto houve redução na porcentagem de plantas acamadas e quebradas.

Além do fósforo e do potássio, é imprescindível destacar a importância do nitrogênio no desenvolvimento da cultura do milho, sendo o nutriente absorvido e exportado em maiores quantidades pela planta (SBCS/NEPAR, 2017). Sendo assim, a cultura do milho é altamente exigente e responsiva à adubação nitrogenada, sendo inserida em vários sistemas produtivos. Entretanto, o nitrogênio é o insumo que mais onera o custo de produção da cultura (Besen *et al.*, 2020). Além disso, o nitrogênio é um nutriente dinâmico no solo, devido à sua alta lixiviação e volatilização, o que eleva seu custo e o torna de grande interesse em estudos que objetivam sua otimização nos sistemas de produção (Gitti *et al.*, 2016).

No entanto, o suprimento inadequado de nitrogênio é um dos principais fatores limitantes à produção de milho, pois esse nutriente desenvolve importantes funções nos

processos bioquímicos, como na constituição de proteínas, coenzimas, ácidos nucleicos, fitocromos, ATP, clorofila e inúmeras enzimas (Cancellier *et al.*, 2011). Além disso, o nitrogênio é um nutriente essencial para a formação de cloroplastos. Nesse contexto, a elevação na produtividade com o acréscimo de doses de nitrogênio está relacionada à maior disponibilidade de fotoassimilados, em virtude de esse nutriente constituir o cloroplasto, e, tendo mais cloroplastos, aumenta a produção de fotoassimilados, o que, em consequência, aumenta a quantidade de carboidratos para a diferenciação celular e o armazenamento nos grãos (Batista *et al.*, 2019).

A produção vegetal depende de diversos fatores, como o melhoramento genético, o clima, o manejo de pragas e doenças e a adubação. O nitrogênio é o nutriente que mais limita o desenvolvimento, a produtividade e a biomassa da maioria das culturas. Além disso, é o nutriente absorvido em maiores quantidades pela maioria das culturas, especialmente pelas gramíneas, como o milho (Oliveira *et al.*, 2010).

Considerando a sua relevância, devido à sua importância e alta mobilidade no solo, o nitrogênio tem sido amplamente estudado com o objetivo de maximizar a eficiência de seu uso. Nesse contexto, busca-se reduzir as perdas de nitrogênio no solo, além de aprimorar sua absorção e metabolização pela planta (Cancellier *et al.*, 2011). Entretanto, apesar da incontestável importância do nitrogênio para o acréscimo na produção agrícola, ainda há dificuldades para se determinar as doses mais econômicas de nitrogênio para a cultura do milho, em especial quando se espera altas produtividades (Caires *et al.*, 2016).

O posicionamento adequado desse nutriente é essencial para alcançar o melhor rendimento econômico, pois afeta diretamente o custo de produção, especialmente em função do aumento constante nos preços dos fertilizantes (Oliveira *et al.*, 2010). Além disso, Zoz *et al.* (2019) concluíram que a adubação nitrogenada associada à distribuição das plantas pode resultar em maior eficiência fotossintética da planta de milho, o que culminará em maior produtividade de grãos e, dessa forma, gerará maior lucro ao produtor.

Contudo, correlacionando a nutrição vegetal com o acréscimo do número de plantas de milho, Molin *et al.* (2010) estudaram as variações de macronutrientes no solo correlacionadas com a população de plantas, verificando que a população de plantas normais possui efeito mais pronunciado sobre a produtividade de grãos do que os teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio e a saturação por bases no solo.

De forma análoga, verifica-se que, à medida que a disponibilidade hídrica e a disponibilidade de nutrientes são otimizadas, deve-se elevar a densidade populacional de

plantas, visando o máximo rendimento de grãos (Cruz *et al.*, 2021). Nesse contexto, destaca-se a importância do manejo nutricional adequado na cultura do milho, conforme observado por Lana *et al.* (2009), os quais apontam que a necessidade nutricional da planta é um fator determinante na definição da densidade populacional de milho, dado o elevado nível de exigência nutricional da cultura. Além disso, os autores ressaltam que o milho apresenta uma resposta progressiva a altas adubações, desde que os demais fatores de produção sejam mantidos em níveis adequados.

3.3.2 Recomendação de adubação para a cultura do milho

A adubação é uma prática agronômica de fornecimento de nutrientes essenciais às plantas, com o objetivo de suprir as exigências nutricionais e garantir seu desenvolvimento adequado. A recomendação de adubação, segundo o Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná (SBCS/NEPAR, 2017), é definida de acordo com as necessidades específicas da cultura, a fase de desenvolvimento, a dinâmica dos nutrientes no solo, os teores de nutrientes no solo, a cultura anterior e a produtividade de grãos esperada.

Especificamente para a semeadura do milho, é recomendado aplicar uma dose de nitrogênio entre 30 e 50 kg ha⁻¹, conforme a cultura antecessora e o potencial produtivo da lavoura. Em cultivos sucedendo gramíneas e com produtividades estimadas elevadas, tende-se a adotar as doses mais próximas do limite superior desse intervalo (Tabela 1).

Tabela 1- Recomendação de adubação nitrogenada para o cultivo de milho no Estado do Paraná, de acordo com a cultura anterior e a produtividade de grãos esperada.

Cultura anterior ¹	Produtividade de grãos esperada (Mg ha ⁻¹)			
	< 8	8 – 12	13 – 16	> 16
	N (kg ha ⁻¹)			
Gramínea	80 - 120	121 – 180	181 - 260	261 – 340
Leguminosa	20 - 60	61 - 120	121 - 200	201 – 280

¹. Cultura anterior com produção de matéria seca superior a 2 t ha⁻¹.

Fonte: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Estadual Paraná. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2017.

Para os nutrientes fósforo (P) e potássio (K), as doses recomendadas na semeadura são definidas com base nos teores disponíveis no solo e na expectativa de produtividade (Tabela 2 e 3). De modo geral, quando a dose de recomendação de K₂O for superior a 60 kg ha⁻¹, deve-se

aplicar até essa quantidade no sulco e o restante em cobertura, juntamente com a primeira adubação nitrogenada da cultura (SBCS/NEPAR, 2017).

Tabela 2 - Recomendação de adubação fosfatada para o cultivo de milho no Estado do Paraná, de acordo com a classe de disponibilidade de fósforo no solo.

P no solo	Produtividade de grãos esperada (Mg ha ⁻¹)			
	< 8	8 – 12	13 – 16	> 16
	P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)			
Muito baixo ¹	110 – 130	Inviável	Inviável	Inviável
Baixo ²	90 – 110	111 – 130	131 – 150	Inviável
Médio ³	70 – 90	91 – 110	111 – 130	131 – 150
Alto ⁴	50 – 70	71 – 90	91 – 110	111 – 130
Muito alto ⁵	30 – 50	51 – 70	71 – 90	91 – 110
Condição a evitar ⁶	0	0	0	0

¹. Teor que proporciona até 40% da produção máxima.

². Teor que proporciona de 40% a 70% da produção máxima.

³. Teor que proporciona de 70% a 90% da produção máxima.

⁴. Teor que proporciona de 90% a 100% da produção máxima.

⁵. Teor que pode proporcionar limitação de produção.

⁶. Teor que pode proporcionar decréscimo de produção, por desequilíbrio nutricional ou toxidez pelo excesso de nutriente, e risco de contaminação ambiental.

Fonte: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Estadual Paraná. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2017.

Tabela 3- Recomendação de adubação potássica para o cultivo de milho no Estado do Paraná, de acordo com a classe de disponibilidade de potássio no solo e a produtividade esperada.

K no solo	Produtividade de grãos esperada (Mg ha ⁻¹)			
	< 8	8 – 12	13 – 16	> 16
	K ₂ O (kg ha ⁻¹)			
Muito baixo ¹	100 – 130	Inviável	Inviável	Inviável
Baixo ²	70 – 110	101 – 130	131 – 160	161 – 190
Médio ³	40 – 70	71 – 100	101 – 130	131 – 160
Alto ⁴	20 – 40	41 – 70	71 – 100	101 – 130
Muito alto ⁵	20	20 – 41	41 – 70	71 – 100
Condição a evitar ⁶	0	0	0	0

¹. Teor que proporciona até 40% da produção máxima.

². Teor que proporciona de 40% a 70% da produção máxima.

³. Teor que proporciona de 70% a 90% da produção máxima.

⁴. Teor que proporciona de 90% a 100% da produção máxima.

⁵. Teor que pode proporcionar limitação de produção.

⁶. Teor que pode proporcionar decréscimo de produção, por desequilíbrio nutricional ou toxidez pelo excesso de nutriente, e risco de contaminação ambiental.

Fonte: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Estadual Paraná. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2017.

Diante da variabilidade espacial existente nas propriedades químicas e físicas, que pode variar significativamente dentro da mesma área cultivada, e com o crescente avanço de técnicas de manejo diferenciado do solo, como a adubação em taxa variável, possibilitadas pela adoção de máquinas específicas na agricultura de precisão, torna-se necessário estabelecer sítios específicos de manejo (Leal *et al.*, 2015).

3.4 SÍTIOS DE MANEJO

A agricultura de precisão consiste na conciliação de recursos agronômicos, atributos do solo e necessidades da cultura, considerando a variabilidade espacial no campo (Dalla Nora *et al.*, 2013). Essa variabilidade espacial, dentro da lavoura, constitui-se como a principal razão para o uso da agricultura de precisão. Conhecer e gerenciar corretamente essa variabilidade pode resultar em um aumento de produtividade e no uso racional dos insumos (Vilela *et al.*, 2011).

Outro ponto relevante é que as propriedades agrícolas apresentam desuniformidade, tanto em relação aos fatores de produção, como fertilidade, topografia e clima, quanto à produtividade obtida. Posto isso, é fundamental que cada área da área precise de um manejo específico para otimizar a rentabilidade e minimizar os impactos ambientais (Borges *et al.*, 2022). O uso das principais técnicas de agricultura de precisão obteve resultados notáveis na agricultura brasileira. Há perspectiva de aumento de 10% na produtividade das três principais culturas agrícolas (soja, cana-de-açúcar e milho) com o uso amplo de técnicas de agricultura de precisão. Isso evidencia o potencial das práticas de agricultura de precisão para otimizar os recursos e aumentar a eficiência na produção. (Mantovani *et al.*, 2020).

Ademais, em áreas de produção de alta tecnologia, é fundamental compreender a variabilidade espacial dos atributos do solo e realizar a utilização de agricultura de precisão, uma vez que pode contribuir para a redução de custos e aumento da produtividade. A produtividade de milho nas lavouras do Brasil vem crescendo consideravelmente na última década, em decorrência dos avanços tecnológicos disponibilizados para a condução da cultura e melhoria do nível de informação e da capacidade gerencial dos agricultores (Resende *et al.*, 2012).

A elaboração de mapas de produtividade pode ser empregada para identificar as causas da variabilidade. Por conseguinte, os resultados obtidos podem ser eficazes na elaboração de soluções para os fatores limitantes (Dalla Nora *et al.*, 2013). Trabalhos com genótipos, populações de plantas e níveis de nitrogênio apontam acréscimo na produtividade à medida que se aumenta a população de plantas, associada à maiores doses de nitrogênio (Zucareli *et al.*, 2019). Posto isto, há a necessidade de realizar o manejo adequado de densidade de semeadura, considerando níveis de nutrientes em função da fertilidade do solo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O delineamento experimental utilizado foi em blocos aleatorizados, com sete tratamentos e três repetições. Os tratamentos consistiram no acréscimo da recomendação padrão de sementes e adubo na cultura do milho (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00 definido pelo Engenheiro Agrônomo responsável pela área) em 15, 30, 45, 60, 75, 90 e 105%. Os sete tratamentos foram aplicados nos três sítios de manejo diferenciado do solo: baixa, média e alta fertilidade. As parcelas ficaram com 585 m² (100 x 5,85 m) para avaliação.

O experimento foi instalado na Fazenda Figueira, município de Carambeí, estado do Paraná, com áreas de sítio de manejo definidas por ferramentas de agricultura de precisão. A localização da propriedade é 24°54'10"S 50°16'24"W, clima temperado, 990 m de altitude e cultivo em sistema de plantio direto por mais de 40 anos. As culturas que compõem a rotação de cultura, além do milho, são: cevada (*Hordeum vulgare*), soja (*Glycine max*), aveia-preta (*Avena strigosa*), feijão (*Phaseolus vulgaris*) e trigo (*Triticum aestivum*).

O solo foi classificado com base nas suas características físicas e químicas para determinar os sítios de manejo de baixa, média e alta fertilidade, definidos pelo teor de argila, capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%). A Tabela 4 apresenta a análise física e química do solo, anterior ao cultivo do milho, nos diferentes sítios de fertilidade.

Tabela 4- Resultados das análises física do solo (0,00 a 0,20m), anterior ao cultivo do milho (*Zea mays*) em sítios de manejo diferenciado do solo (baixa, média e alta fertilidade), da fazenda Figueira / Carambeí - PR, Safra 2024-25.

Solo			Argila (%)		Silte (%)			Areia (%)		
Baixa			29,80		6,20			64,00		
Média			30,20		6,85			62,95		
Alta			47,55		15,00			37,45		
Solo	pH	MO	Al ³⁺	H + Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC	V	P
	(CaCl ₂)	(g dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³).....						(%)	(mg dm ⁻³)
Baixa	5,19	23,23	0,0	38,44	29,00	14,60	4,68	86,7	55,67	53,00
Média	5,62	33,73	0,0	34,27	42,10	21,50	6,91	104,7	67,29	110,00
Alta	5,67	41,08	0,0	41,25	53,30	33,30	7,64	135,4	69,55	71,00

9

1-Materia orgânica; H + Al = solução tampão SMP; Al, Ca, Mg trocáveis = KCL 1 mol L⁻¹; P e K Melich e CTC efetiva. Em cobertura, foram realizadas duas adubações de 200 kg ha⁻¹ de 36-00-12 (NPK) nos estádios fenológicos V3 e V6 - segundo Magalhães e Durães (2006).

O híbrido de milho escolhido para cultivo na propriedade agrícola foi o AG9021PRO3™, pela representatividade na região. A semeadora ocorreu dia 28 de setembro de 2024, com espaçamento de 0,45 m. A adubadora-semeadora utilizada possui sistema de taxa variável de adubo e sementes, modelo Cinderela 13 da marca Stara™. O tracionador foi o trator New Holland™, modelo T7.245.

Os demais manejos da cultura seguiram as orientações do profissional responsável pela área, com o mesmo padrão em todos os tratamentos. As variáveis analisadas foram: população inicial, organismos indesejados (plantas daninhas, pragas e doenças), acamamento, população final (espigas ha⁻¹), componentes de rendimento da cultura do milho (espigas ha⁻¹, grãos por espiga, massa de mil grãos e produtividade) e o retorno econômico.

A população inicial foi contabilizada com três folhas expandidas (V3 segundo estágio proposto por Magalhães e Durães, 2006), com valores convertidos para hectare. Os organismos indesejados (plantas daninhas, pragas e doenças) foram verificados em cada tratamento diante a definição de cada manejo. Para avaliação dos insetos-pragas foi utilizado o pano de batida para realizar a contagem e o reconhecimento no estágio fenológico V5 (Magalhães; Durães, 2006). Nas doenças foram determinadas a incidência (porcentagem de plantas enfermas) e severidade (porcentagem da planta afetada pelos patógenos) no estágio fenológico VT (Magalhães; Durães, 2006). A identificação e quantificação das plantas daninhas se deu pelo registro de presença ou não das invasoras nas parcelas do estágio fenológico V3 até VT (Magalhães; Durães, 2006).

A colheita ocorreu em 25 de janeiro de 2025, a partir do estágio fenológico R6 (Magalhães; Durães, 2006). Os componentes de rendimento foram mensurados na maturação dos grãos, obtidos por processo manual. A determinação da massa de mil grãos e a produtividade se deu com 1,0% de impurezas e com umidade corrigida para 14,0%. A umidade foi constatada com o uso de um medidor de umidade (Motomco™, modelo 999ESI). A massa de mil grãos foi definida por meio de uma balança digital 0,1 a 500 g Diamond™. A mensuração da produtividade se deu com auxílio de uma balança digital Ramud™, com capacidade para 50 kg.

O retorno econômico foi calculado subtraindo do valor do milho produzido em cada tratamento do custo de sementes e adubo distribuído na semeadura. Desta forma, obteve-se o lucro em cada tratamento e pode-se determinar a melhor relação custo-benefício.

Os valores registrados foram submetidos aos testes de Hartley, para verificação da homocedasticidade das variâncias, Shapiro-Wilk, para examinar a normalidade dos dados e

independência dos erros pelo teste de Durbin-Watson. As variáveis mensuradas foram analisadas pelos testes Fisher-Snedecor e regressão polinomial, com um intervalo de confiança com 95% de probabilidade. O programa estatístico utilizado foi o AgroR™ (Shimizu; Marubayashi; Gonçalves, 2024).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as variáveis avaliadas apresentaram homocedasticidade e normalidade das variâncias, dispensando a transformação dos dados [Hartley; Shapiro-Wilk e Durbin-Watson ($p > 0,05$)]. Foram observadas diferenças significativas entre os blocos apenas nas variáveis população final de plantas no sítio de alta fertilidade, produtividade e retorno econômico nos sítios de média e alta fertilidade.

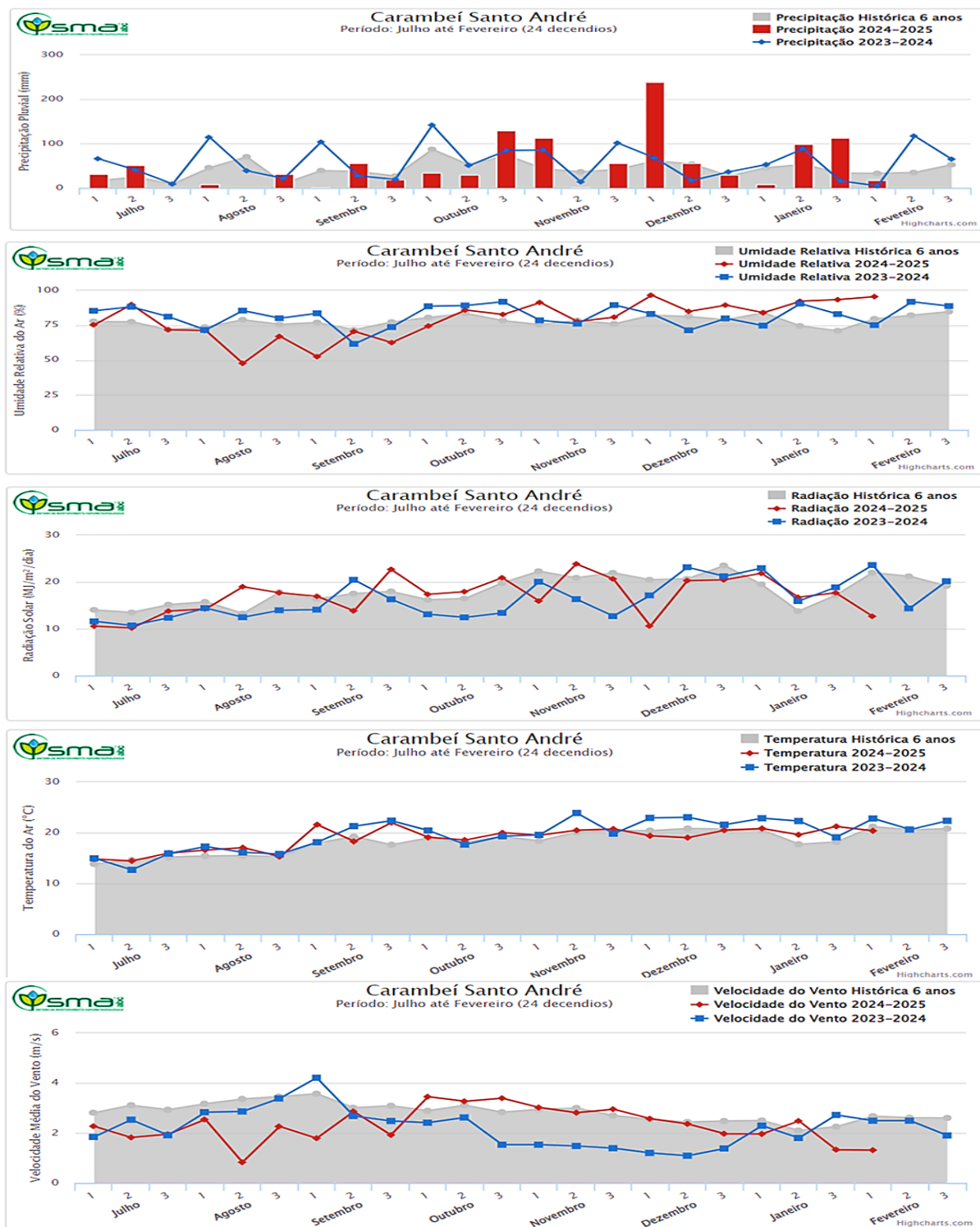
Dentre as condições do tempo observadas ao longo do ciclo da cultura, destaca-se a ocorrência de precipitação acumulada acima da média histórica. Essa condição foi acompanhada por redução na radiação solar durante as fases do início do desenvolvimento da cultura e no período de enchimento dos grãos na espiga (Figura 1).

Em relação à variável população inicial de plantas de milho (Figura 2), a análise estatística indicou comportamento linear crescente em função do acréscimo de sementes e adubação na semeadura. Esse padrão foi observado nos três sítios de manejo (solos de baixa, média e alta fertilidade), com altos coeficientes de determinação ($R^2 = 0,98$; $R^2 = 1,00$; e $R^2 = 0,99$, respectivamente), indicando elevado ajuste dos modelos lineares. A linearidade da resposta sugere que as condições de semeadura foram adequadas, e que não houve limitações significativas na emergência das plântulas. Dessa forma, a eficiência de emergência foi mantida de forma consistente em todos os tratamentos.

Entretanto, os resultados obtidos não corroboram com as observações de Sangoi *et al.* (2010a), os quais relataram maior variabilidade entre plantas em decorrência do incremento na densidade populacional. Diferentemente do que foi descrito por esses autores, os dados obtidos demonstraram homogeneidade no desenvolvimento das plantas mesmo com o aumento do número de indivíduos por unidade de área.

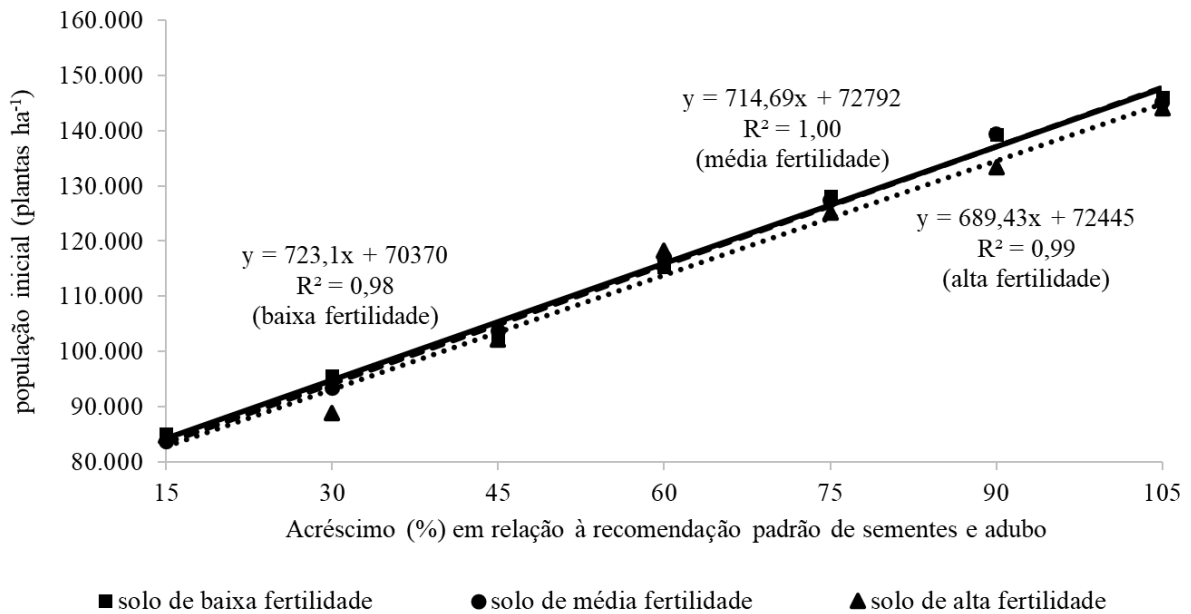
Destaca-se a relevância de uma distribuição adequada das sementes, sobretudo no que diz respeito ao controle da velocidade de semeadura. Isso se deve ao fato que a qualidade da semeadura pode influenciar a população de plantas com espiga e, conseqüentemente, impactar diretamente a produtividade da cultura (Garcia *et al.*, 2006).

Figura 1- Condições do tempo no período de condução do experimento com a cultura do milho (*Zea mays*).



Fonte: **FUNDAÇÃO ABC**. Sistema de monitoramento agrometeorológico, 2025. Disponível em: <https://sma.fundacaoabc.org/>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2025.

Figura 2- População inicial de milho (*Zea mays*), 20 dias após a emergência, híbrido AG9021PRO3™, safra 2024-25, com acréscimo percentual de sementes e adubação na semeadura em relação à recomendação padrão (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00), em distintos sítios de manejo do solo da Fazenda Figueira, Carambeí - PR, ($p < 0,05$).



Fonte: O autor.

Vale ressaltar a importância da regularidade da distribuição espacial, uma vez que a irregularidade na emergência das plantas de milho pode reduzir a eficiência de aproveitamento de água, luz e nutrientes, favorecendo o surgimento de plantas com desenvolvimento fenológico desuniforme, colmos frágeis e dominadas na lavoura, resultando na produção de espigas menores (Sangoi *et al.*, 2013). Nesse contexto, Henrichsen *et al.* (2021) observaram maiores produtividades em estande de plantas de milho com emergência mais homogênea, em comparação com os tratamentos com maiores desuniformidades de estande na cultura.

No que se refere ao manejo fitossanitário, não foram identificadas diferenças entre os tratamentos para a ocorrência de pragas e doenças. Os resultados convergem com Spagnollo *et al.* (2016), os quais verificaram que a incidência de grãos ardidos e de *Fusarium verticillioides*, *Fusarium graminearum* e *Stenocarpella maydis* em grãos de milho não foi influenciada pelo arranjo espacial e densidade de plantas de milho, podendo ser justificado pelo fato de que os tratos culturais, quando devidamente aplicados, podem evitar que o microclima gerado pelo aumento da população de plantas favoreça a incidência de doenças.

Segundo Casa *et al.* (2007), embora o incremento do número de plantas por área seja uma estratégia para aumentar a eficiência da interceptação da radiação solar, ele pode favorecer a incidência de doenças, especialmente as podridões do colmo e os grãos ardidos. No entanto, os autores verificaram que a adoção de uma densidade adequada ao híbrido, aliada ao uso de sementes sadias e à semeadura em área de plantio direto com rotação de culturas (como soja ou feijão), são práticas que contribuem para a redução da incidência dessas doenças e o aumento do rendimento de grãos, mesmo em maiores populações de plantas.

Acerca da ocorrência de plantas daninhas, não foram apresentadas diferenças significativas entre os tratamentos. O uso do plantio direto com a deposição de palhada, a utilização de maiores populações de milho e de híbridos com maior capacidade de desenvolvimento inicial e arquitetura moderna permitem que as plantas de milho sobressaiam no solo mais rapidamente, reduzindo a capacidade competitiva das plantas daninhas (Galvão *et al.*, 2014). Adicionalmente, o incremento da densidade populacional de plantas contribui para a supressão da competição interespecífica com plantas daninhas, reduzindo a incidência e o desenvolvimento de plantas infestantes (Balbinot Júnior *et al.*, 2011).

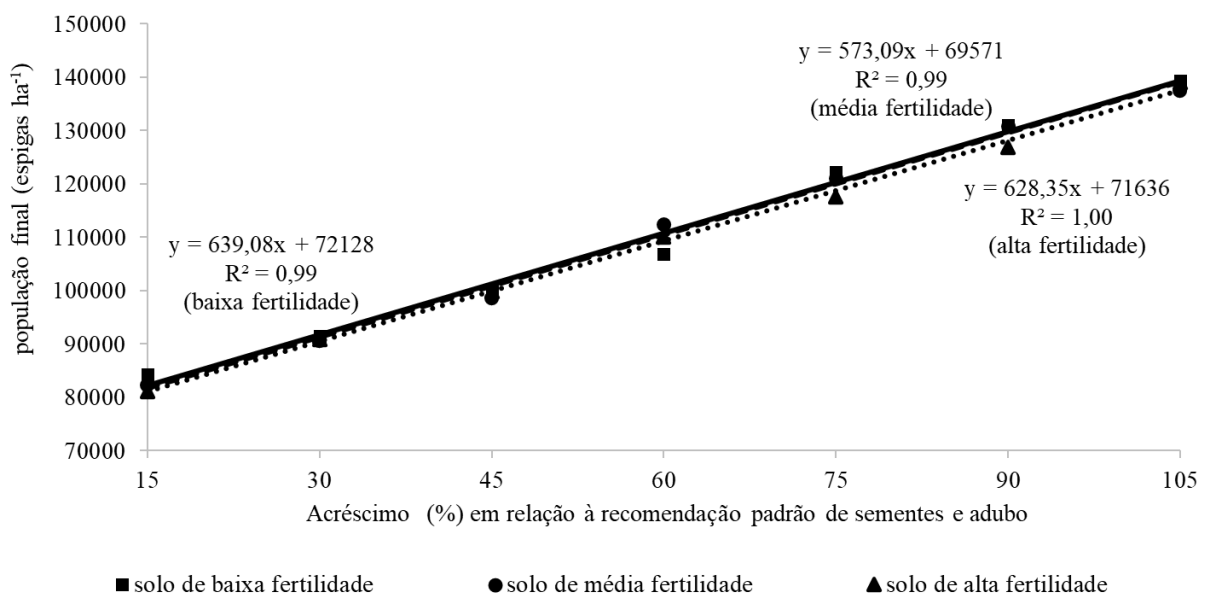
A respeito da população de plantas acamadas não foi significativamente afetada pela variação na densidade de plantas. A porcentagem de acamamento foi de, no máximo, 4%, com valores de zero em vários tratamentos, impossibilitando a análise de variância. No entanto, segundo Sangoi *et al.* (2019), densidades populacionais elevadas promovem modificações na arquitetura da planta, estimulando a elongação dos entrenós, a produção de colmos mais compridos e com menor diâmetro, características que aumentam de forma expressiva a probabilidade de acamamento das plantas. Contudo, tais afirmações não se confirmam pelos dados coletados nesta pesquisa.

Ao analisar cultivares de milho em diferentes populações de plantas, Foloni *et al.* (2015) evidenciaram que não houve interação entre a porcentagem de plantas acamadas e a população de plantas, sendo essa ausência de relação justificada principalmente pelo material genético e pela maior sustentação física gerada pela proximidade entre as plantas. Portanto, a baixa porcentagem de acamamento pode ser justificada tanto pela sustentação física ocasionada pela proximidade entre plantas quanto pelo fato de o híbrido escolhido apresentar excelente qualidade de colmo e raiz. Segundo Farinelli *et al.* (2012), esse comportamento pode ser justificado pelo fato de que, além de ser dependente pelo genótipo do milho, o acamamento pode ser negativamente afetado por fatores abióticos e bióticos, como a ocorrência de ventos, a incidência de insetos-praga e a presença de doenças de colmo e radiculares.

Nesse sentido, os resultados obtidos vão ao encontro do estudo de Pereira *et al.* (2009), o qual relata que a aplicação da maior dose de fertilizantes não gerou aumento significativo na produtividade de grãos. Contudo, contribuiu para a redução da porcentagem de plantas acamadas e quebradas, o que pode indicar que outros fatores, além da densidade, influenciam o acamamento em determinadas condições de cultivo.

A respeito da avaliação da população final de plantas de milho, os resultados das análises estatísticas indicaram uma tendência linear crescente do número de plantas seguindo o aumento uniforme de números de sementes alocadas no solo (Figura 3). Esse comportamento foi consistente entre os três sítios de manejo, com elevados coeficientes de determinação ($R^2 = 0,99$ para solos de baixa e média fertilidade; $R^2 = 1,00$ para solo de alta fertilidade), indicando sólido ajuste dos modelos lineares.

Figura 3- População final de milho (*Zea mays*), mensurado no estágio fenológico R6 (Magalhães; Durães, 2006), híbrido AG9021PRO3™, safra 2024-25, com acréscimo percentual de sementes e adubação na semeadura em relação à recomendação padrão (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00), em distintos sítios de manejo do solo da Fazenda Figueira, Carambeí - PR, ($p < 0,05$).



Fonte: O autor.

No entanto, a população final de plantas foi, em média, 5% menor em comparação com a população inicial. Resultado semelhante ao observado por Foloni *et al.* (2015), que, ao avaliarem o desempenho de diferentes cultivares de milho em função da variação da população

de plantas, constataram uma redução em torno de 6% em relação às populações definidas no início do experimento.

Diferentemente de outras culturas, o milho não apresenta elevada plasticidade morfológica para compensar falhas no estande. Dessa forma, o número de plantas por área e a produção individual por planta os principais componentes determinantes da produtividade (Silva *et al.*, 2016).

Posto isso, vale ressaltar que a população final de plantas de milho, com distribuição uniforme e o menor número de plantas dominadas, é determinante para a obtenção de altas produtividades na cultura do milho (Vian *et al.*, 2016). Cabe ressaltar, também, que o estabelecimento de lavouras com maior uniformidade espacial possibilita que as plantas possuam o mesmo fornecimento de substrato, contribuindo para o aumento do número de grãos produzidos por unidade de área (Sangoi *et al.*, 2013). Em consequência disso, o aumento linear da população final de plantas sugere que o manejo adotado foi eficiente para a formação adequada das plantas em todos os tratamentos, sem evidências de limitações na formação da população final, mesmo com o aumento da densidade populacional.

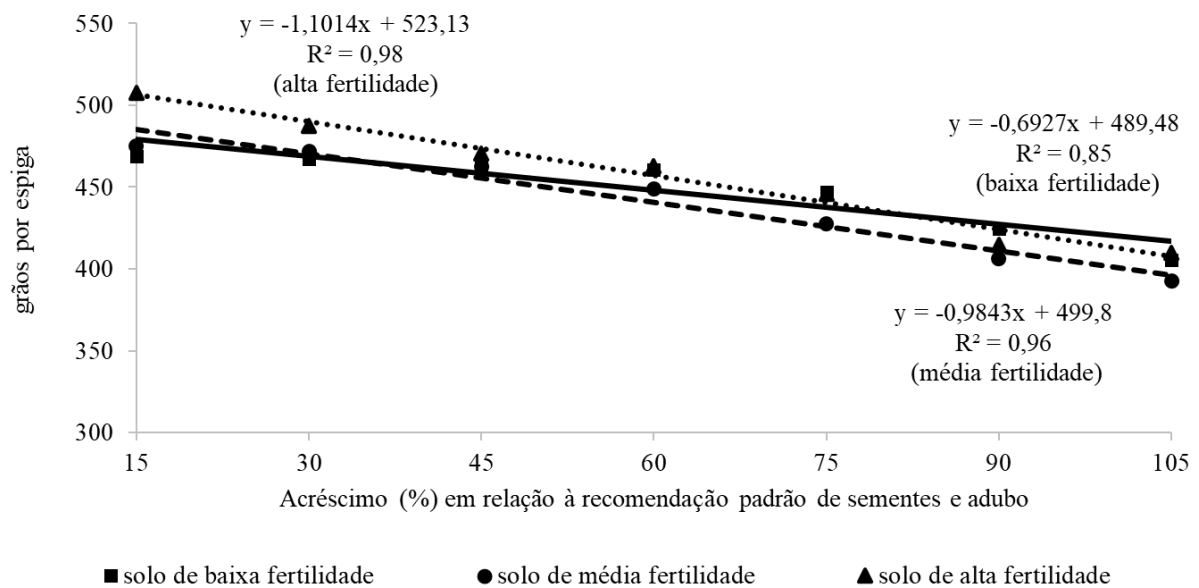
Para o número de grãos por espiga, é possível observar uma tendência linear decrescente no número de grãos formados na espiga nos três sítios de manejo, à medida que se aumenta a densidade populacional e a adubação na semeadura (Figura 4). Os coeficientes de determinação elevados sugerem ajuste eficiente dos modelos ($R^2 = 0,85$ para solos de baixa fertilidade; $R^2 = 0,96$ para solos de média fertilidade; $R^2 = 0,98$ para solo de alta fertilidade).

Os resultados corroboram Brachtvogel *et al.* (2009), que atribuíram a redução do número de grãos por espiga, bem como o encurtamento das espigas, ao aumento da competição intraespecífica decorrente de maiores densidades populacionais ou de estresses ambientais. Nesse cenário, a planta tende a abortar os grãos localizados na extremidade da espiga, uma vez que menos recursos estão disponíveis para cada indivíduo. Santos *et al.* (2018) atribuíram o resultado ao fato de que, em menores densidades populacionais, reduz-se a competição entre as plantas por recursos hídricos e nutrientes, além de minimizar o sombreamento, apresentando condições ideais para a formação das espigas, estabelecendo maior quantidade de grãos por espiga.

Em relação ao desenvolvimento das espigas, na cultura do milho, a determinação do número de grãos por espiga ocorre após a exteriorização do pendão e dos estigmas da espiga, durante o período de florescimento, sendo altamente dependente do fluxo de fotoassimilados que ocorre nesse período (Lana *et al.*, 2009). Além disso, a densidade excessiva no milho pode

resultar na defasagem entre o florescimento masculino (pendoamento) e o florescimento feminino (espigamento), resultando em uma menor polinização e, como consequência, um menor número de grãos por espiga (Kappes *et al.*, 2011).

Figura 4- Grãos por espiga de milho (*Zea mays*), mensurado no estágio fenológico R6 (Magalhães; Durães, 2006), híbrido AG9021PRO3™, safra 2024-25, com acréscimo percentual de sementes e adubação na semeadura em relação à recomendação padrão (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00), em distintos sítios de manejo do solo da Fazenda Figueira, Carambeí - PR, ($p < 0,05$).



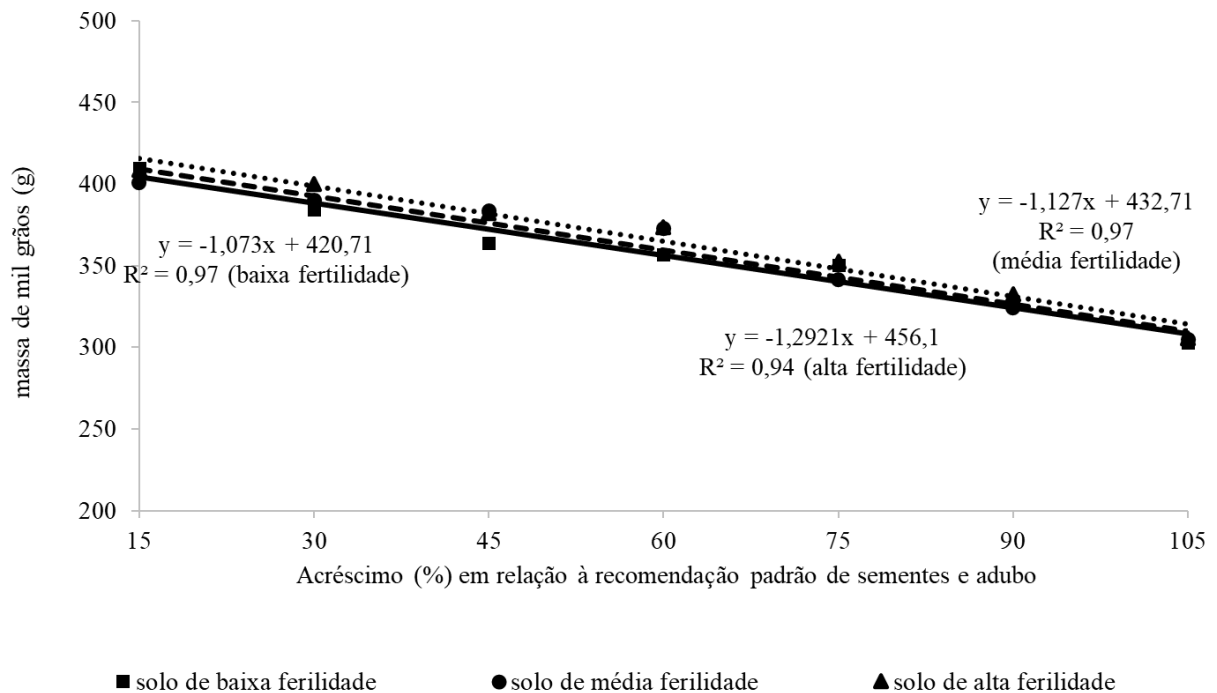
Fonte: O autor.

No que se refere à massa de mil grãos, foi observada uma tendência de redução linear com o acréscimo de sementes e adubação na semeadura (Figura 5). Essa tendência foi observada de maneira consistente nos três sítios de manejo, com coeficientes de determinação elevados ($R^2 = 0,97$ para solos de baixa e alta fertilidade; $R^2 = 0,94$ para solo de média fertilidade), indicando adequada relação entre o aumento da densidade populacional de plantas e a redução da massa dos grãos. Essa tendência foi observada por vários autores (Farinelli *et al.*, 2012; Zoz *et al.*, 2019; e Brachtvogel *et al.*, 2009). Isso se explica pelo fato de que o adensamento reduz a penetração da radiação solar no interior do dossel da cultura, acelerando a senescência foliar, reduzindo a duração do período de enchimento de grãos e promovendo a produção de grãos de menor massa (Sangoi; Silva, 2016).

Outro aspecto relevante está relacionado ao aumento da competição intraespecífica decorrente do aumento da população de plantas por unidade de área, na qual a intensificação da

competição por radiação solar e nutrientes influencia diretamente a massa de mil grãos, promovendo a formação de espigas menores, resultando também na redução do tamanho dos grãos e, conseqüentemente, na redução da massa de grãos (Vitorazzi *et al.*, 2017). Além disso, vale ressaltar que a disponibilidade de carboidratos por unidade de grão reduz de forma linear à medida que se aumenta a população de plantas, comprometendo a massa de mil grãos (Takasu *et al.*, 2014b).

Figura 5- Massa de mil grãos de milho (*Zea mays*), mensurado no estágio fenológico R6 (Magalhães; Durães, 2006), híbrido AG9021PRO3™, safra 2024-25, com acréscimo percentual de sementes e adubação na semeadura em relação à recomendação padrão (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00), em distintos sítios de manejo do solo da Fazenda Figueira, Carambeí - PR, ($p < 0,05$).

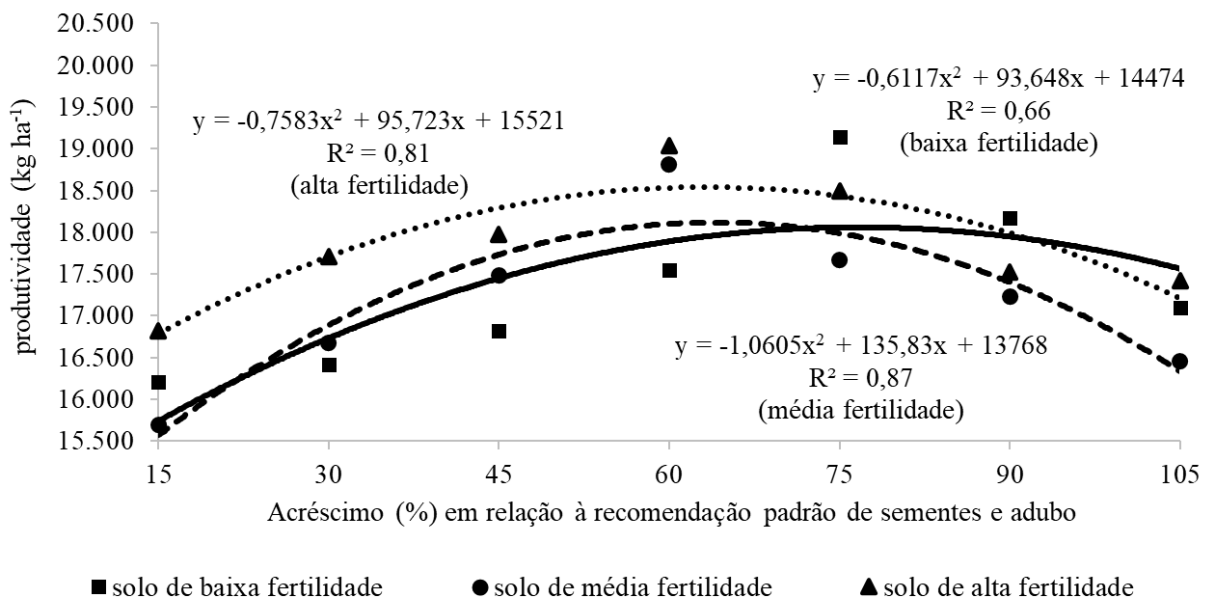


Fonte: O autor.

A análise dos dados de produtividade (Figura 6) demonstrou padrões semelhantes entre os três sítios de manejo, embora com valores distintos. Os dados ajustaram-se a modelos quadráticos com coeficientes de determinação elevados nos solos de média ($R^2 = 0,81$) e alta fertilidade ($R^2 = 0,87$), indicando bom ajuste do modelo e consistência dos resultados. Para o sítio de baixa fertilidade do solo, observou-se que o acréscimo de 76% na recomendação padrão de sementes e adubo na semeadura resultou em maior produtividade final, obtendo-se uma

produtividade de 18.058 Mg ha⁻¹. No sítio de média fertilidade, o acréscimo da recomendação padrão foi de 64% em relação à recomendada, resultando em uma produtividade de 18.119 Mg ha⁻¹. Enquanto no sítio de alta fertilidade, a maior produtividade foi obtida quando houve o incremento de 63% da recomendação padrão, resultando em uma produtividade de 18.542 Mg ha⁻¹.

Figura 6- Produtividade de milho (*Zea mays*), híbrido AG9021PRO3™, safra 2024-25, com acréscimo percentual de sementes e adubação na semeadura em relação à recomendação padrão (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00), em distintos sítios de manejo do solo da Fazenda Figueira, Carambeí - PR, ($p < 0,05$).



Fonte: O autor.

As respostas da produtividade de grãos em diferentes sítios de manejo, reforçam os resultados de Molin *et al.* (2010). Os pesquisadores verificaram a variação da produtividade de milho correlacionada com a população de plantas e os macronutrientes, concluindo que a população de plantas exerce efeito maior sobre a produtividade, enquanto os teores de macronutrientes no solo apresentaram um efeito menos pronunciado.

O aumento da produtividade, decorrente do aumento da recomendação padrão do número de plantas por área, pode ser atribuído à melhor ocupação da área e melhor aproveitamento dos recursos disponíveis. Sobretudo da radiação solar, devido à arquitetura moderna de plantas, a qual permite um adensamento maior de plantas e consequentemente a colheita de maior número de espigas por hectare (Kappes *et al.*, 2011).

Ademais, a elevada produtividade observada em maiores populações de plantas pode ser atribuída à maior disponibilidade de nutrientes fornecidos na semeadura juntamente com as maiores populações de plantas, mas também à alta disponibilidade hídrica registrada durante o ciclo da cultura, estando acima da média histórica na região. Essa condição favorece o aumento da densidade de plantas, uma vez que há indicação de aumento da densidade populacional quando a disponibilidade nutricional e hídrica for otimizada. Associado a isso, o incremento de produtividade em altas densidades de plantas também pode ser atribuído ao uso de um híbrido hiperprecoce, considerando que cultivares precoces exigem maior densidade de plantio em comparação às cultivares tardias para expressarem seu máximo potencial produtivo. Isso se deve à arquitetura diferenciada dessas plantas, caracterizadas por menor altura e menor massa vegetativa. Tais características morfológicas reduzem o sombreamento no interior do dossel da cultura, permitindo a adoção de menores espaçamentos entre plantas e, conseqüentemente, otimizando o aproveitamento da radiação solar incidente (Cruz *et al.*, 2021).

Ressalta-se que os resultados obtidos estão coerentes com as observações de Sangoi *et al.* (2019), os quais destacam que a elevação da densidade de plantas como alternativa para aumentar a produtividade é mais eficiente ao utilizar híbridos simples, de alto potencial produtivo, cultivados sem restrições edafoclimáticas, em regiões com alta disponibilidade de radiação solar, grande amplitude térmica e com espaçamentos entre linhas reduzidos. Condições presentes também neste experimento.

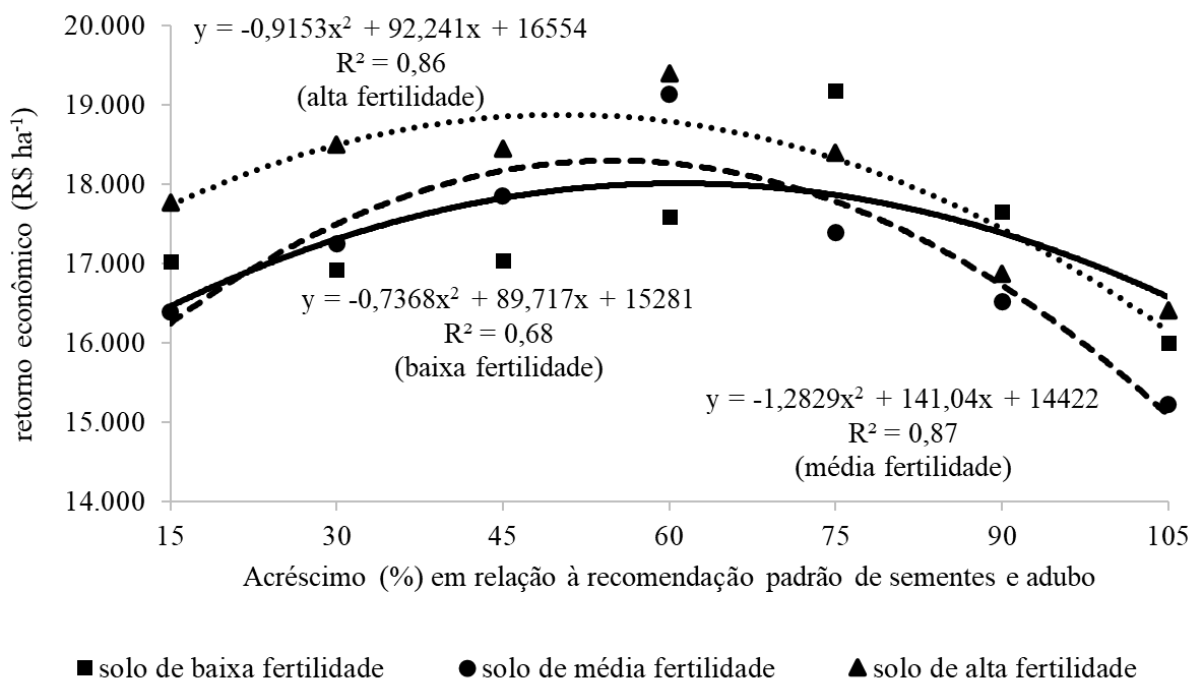
Apesar de o aumento do número de sementes e da adubação ter ocasionado perdas lineares nos componentes de rendimento, como o número de grãos por espiga e a massa de mil grãos, essas perdas foram compensadas por um maior número de plantas e, conseqüentemente, por um maior número de espigas por área. Os resultados estão em concordância com o estudo realizado por Santos *et al.* (2018), que verificaram que o componente que melhor se correlacionou com a produtividade final de grãos foi o número de espigas por área. Porém, essa compensação ocorre até que o maior número de espigas por área não seja mais suficiente para compensar a redução do número e da massa dos grãos.

Tradicionalmente, a cultura do milho é um dos segmentos da agricultura que mais tem gerado insatisfações aos produtores, principalmente em razão da baixa lucratividade (Bianchetto *et al.*, 2017). No contexto de produção agrícola, indiferente dos resultados alcançados em termos de produtividade, o principal objetivo é obter um retorno econômico satisfatório. Os valores obtidos se diferem em cada sítio de manejo. Portanto, a análise deve

considerar não apenas a produtividade, mas também a viabilidade econômica do incremento do adubo e sementes, avaliando se os custos são justificados pelos ganhos econômicos.

A Figura 7 apresenta os resultados obtidos para o retorno econômico em relação à produtividade. Tais valores foram obtidos subtraindo os custos de semente e adubo na semeadura do valor da venda da produção, híbrido AG9021PRO3™, safra 2024-25. O custo da saca de 60.000 sementes foi de R\$ 1.307,41 e o preço do adubo 18-10-00 foi de R\$ 1,78 por quilograma em 2024 e o preço de venda da saca de milho foi de R\$ 73,00 em 2025.

Figura 7- Retorno econômico da cultura do milho (*Zea mays*), subtraindo os custos de semente e adubo na semeadura do valor da venda da produção, híbrido AG9021PRO3™, safra 2024-25, com acréscimo percentual de sementes e adubação na semeadura em relação à recomendação padrão (75 mil sementes e 400 kg ha⁻¹ da formulação de NPK 18-10-00), em distintos sítios de manejo do solo da Fazenda Figueira, Carambeí - PR, ($p < 0,05$).



Fonte: O autor.

Avaliando o retorno econômico do milho em diferentes sítios de manejo, observou-se que o acréscimo de sementes e adubo em relação à recomendação padrão impactou de forma significativa os resultados financeiros da cultura. Os dados foram ajustados por modelos quadráticos que apresentaram elevado coeficiente de determinação, destacando a consistência dos resultados, especialmente nos solos de média ($R^2 = 0,87$) e alta fertilidade ($R^2 = 0,86$). O maior retorno econômico foi observado no solo de alta fertilidade, com acréscimo de

aproximadamente 56% na recomendação padrão de insumos, resultando em R\$ 19.163,00 ha⁻¹. No sítio de manejo de média fertilidade, o ponto ótimo foi observado com 55% de incremento, alcançando retorno de R\$ 18.298,00 ha⁻¹. Na zona de baixa fertilidade do solo, o maior retorno econômico foi registrado com 60% de incremento, conseguindo R\$ 18.012,00 ha⁻¹.

Os resultados obtidos estão em consonância com os resultados observados por Zhang *et al.* (2022), que verificaram, em condições de solo franco-arenoso, que a densidade populacional de 120 mil sementes ha⁻¹ resultou no maior rendimento de grãos (21,1 Mg ha⁻¹) e no maior retorno econômico (3.036,01 US\$ ha⁻¹). De maneira semelhante, neste trabalho, os maiores valores de retorno econômico foram obtidos nas faixas populacionais entre 116.250 e 120.000 plantas por hectare.

Diante disso, o aumento da recomendação de sementes e adubação deve levar em consideração as características específicas do sítio de manejo. Os resultados demonstraram que, em solos de baixa fertilidade, pode ser mais economicamente vantajoso o uso maior de insumos, enquanto, em solos de média e alta fertilidade, o acréscimo menor de insumos é suficiente para garantir o maior retorno econômico. Os resultados refutam Lana *et al.* (2009), os quais ressaltam que, em cenários de projeção de menor produtividade, especialmente sob condições de baixa disponibilidade de nitrogênio, é recomendável a redução da densidade populacional ótima de plantas de milho.

O retorno econômico da cultura do milho está diretamente relacionado à adequação da recomendação padrão de sementes e insumos agrícolas. Assim, conhecer a variabilidade dos atributos do solo é essencial para contribuir para a redução de custos e aumento de produtividade (Dalla Nora *et al.*, 2013). Dessa forma, considerando o elevado custo dos insumos agrícolas, torna-se essencial identificar a densidade de plantas mais adequada para cada zona de manejo, visto que os materiais possuem uma limitação de produtividade de acordo com a densidade populacional, evitando custos desnecessários com a aquisição de insumos em elevadas densidades populacionais (Batista *et al.*, 2019).

6 CONCLUSÕES

Conclui-se que as variáveis população inicial e população final apresentaram um crescimento linear. Em contrapartida, as variáveis grãos por espiga e massa de mil grãos declinaram linearmente com o acréscimo de adubo e sementes. Para a ocorrência de plantas daninhas, pragas, doenças fitopatogênicas e acamamento, não houve diferenças significativas entre os sítios de manejo.

Para as variáveis de produtividade final de grãos e retorno econômico da cultura do milho, a modelagem estatística indicou que a regressão quadrática foi a que melhor explicou a relação entre os fatores analisados. Para maximizar a produtividade, recomenda-se que, em sítios de baixa, média e alta fertilidade, haja o acréscimo de 76, 64 e 63% da recomendação padrão de adubo e sementes, respectivamente. Em relação à maximização do retorno econômico, recomenda-se o acréscimo da recomendação padrão em 60, 55 e 56%, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- BALBINOT JÚNIOR, A. A. B., VOGT, G. A., & TREZZI, M. M. Integração de práticas para o manejo de plantas daninhas na cultura do milho. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.12, n.2, p. 81-87, mar./abr. 2011.
- BATISTA, V. V. *et al.* Densidades de plantas e níveis de nitrogênio no desempenho de híbridos de milho em safrinha. **Nativa**, Dois Vizinhos, v. 7, n. 2, p. 117-125, mar./abr. 2019.
- BESSEN, M. R. *et al.* Produtividade de milho e retorno econômico em sistema integrado de produção com doses de nitrogênio. **Revista de Ciências Agroveterinárias**. Lages, v. 19, n. 1, p. 94–103, abr. 2020.
- BIANCHETTO, R.; FONTANIVE, D. E.; CEZIMBRA, J. C. G.; KRYNSKI, A. M.; RAMIRES, M. F.; ANTONIOLLI, Z. I.; SOUZA, E. L. Desempenho agrônômico de milho crioulo em diferentes níveis de adubação no Sul do Brasil. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 528–545, dez. 2017.
- BOIAGO, R.; GARCIA, R.; SCHUELTER, A. R.; BARRETO, R.; DA SILVA, G. J.; SCHUSTER, I. Combinação de espaçamento entrelinhas e densidade populacional no aumento da produtividade em milho. **Revista Brasileira De Milho E Sorgo**, Sete Lagoas, v. 16, n. 3, p. 440–448, dez. 2017.
- BORGES, L. C.; NASCIMENTO, A. R.; MORGADO, C. M. A. Agricultura de precisão: ferramenta de gestão na rentabilidade e produtividade de grãos. **Scientific Electronic Archives**, [S. l.], v. 15, n. 3, mar. 2022.
- BORGHI, E.; MELLO, L. M. M. de; CRUSCIOL, C. A. C. Adubação por área e por planta, densidade populacional e desenvolvimento do milho em função do sistema de manejo do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**. Maringá, v. 26, n. 1, p. 337-345, ago. 2004.
- BRACHTVOGEL, E. L. *et al.* Densidades populacionais de milho em arranjos espaciais convencional e equidistante entre plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 8, p. 2334-2339, nov. 2009.
- CAIRES, E. F.; MILLA, R. Adubação nitrogenada em cobertura para o cultivo de milho com alto potencial produtivo em sistema de plantio direto de longa duração. **Bragantia**, Campinas, v. 75, n. 1, p. 87-95, jan./mar. 2016.
- CALONEGO, J. C. *et al.* Produtividade e crescimento de milho em diferentes arranjos de plantas. **Agrarian**. Dourados - MS, v. 4, n. 12, p. 84-90, jun. 2011.
- CANCELLIER, L. L. *et al.* Eficiência no uso de nitrogênio e correlação fenotípica em populações tropicais de milho no Tocantins. **Revista Ciência Agronômica**. São Paulo, v. 42, p. 139-148, mar. 2011.
- CASA, R. T.; MOREIRA, E. N.; BOGO, A.; SANGOI, L. Incidência de podridões do colmo, grãos ardidos e rendimento de grãos em híbridos de milho submetidos ao aumento na

densidade de plantas. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 33, n. 4, p. 353-357, dez. 2007.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Grãos, Safra 2023/24 – Nono Levantamento**. Brasília: Conab, v. 11, n. 9, jun. 2024.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. **Espaçamento e densidade**. Brasília: EMBRAPA, dez. 2021.

DALLA NORA, D. *et al.* Agricultura de precisão: variabilidade dos atributos químico-físicos do solo e Relação com a produtividade do milho. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**. Viçosa, v. 21, n. 1, p. 59-68, jan./fev. 2013.

FARINELLI, R.; PENARIOL, F. G.; FORNASIERI FILHO, D. Características agronômicas e produtividade de cultivares de milho em diferentes espaçamentos entre linhas e densidades populacionais. **Científica**, Dracena, SP, v. 40, n. 1, p. 21–27, mai. 2012.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; CATUCHI, T. A.; BELLEGGIA, N. A.; TIRITAN, C. S.; BARBOSA, A. D. M. Cultivares de milho em diferentes populações de plantas com espaçamento reduzido na safrinha. **Revista Brasileira De Milho E Sorgo**, Sete Lagoas, v. 13, n. 3, p. 312–325, abr. 2015.

FUNDAÇÃO ABC. Sistema de monitoramento agrometeorológico, 2025. Disponível em: <https://sma.fundacaoabc.org/>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2025.

GALVÃO, J. C. C. *et al.* Sete décadas de evolução do sistema produtivo da cultura do milho. **Revista Ceres**, São Paulo, v. 61, p. 819-828, dez. 2014.

GARCIA, L. C. *et al.* Influência da velocidade de deslocamento na semeadura do milho. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 520-527, abr./jun. 2006.

GITTI, D. C. *et al.* Doses e épocas de aplicação do nitrogênio no milho safrinha. **Fertilidade e nutrição de plantas**, Bento Gonçalves, RS, v. 40, n. 1, p. 469–472, set. 2016.

HENRICHSEN, L. H. *et al.* Efeitos da desuniformidade de emergência na cultura do milho. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 3, p. 28382-28398, mar. 2021.

HURTADO, S. M. C. *et al.* **Agricultura de precisão**: possibilidades de manejo da adubação nitrogenada para o milho no Cerrado. 1.ed. Embrapa Cerrados, Planaltina – DF, mai. 2008.

KAPPES, C. *et al.* Desempenho de híbridos de milho em diferentes arranjos espaciais de plantas. **Bragantia**. São Paulo, v. 70, p. 334-343, ago. 2011.

LACERDA, J. J. J. *et al.* Adubação, produtividade e rentabilidade da rotação entre soja e milho em solo com fertilidade construída. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, p. 769-778, set. 2015.

LANA, M. D. C.; WOYTICHOSKI, J. P. P.; BRACCINI, A. L.; SCAPIM, C. A.; ÁVILA, M. R.; ALBRECHT, L. P. Arranjo espacial e adubação nitrogenada em cobertura na cultura do milho. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 3, p. 433-438, set. 2009.

LEAL, A. J. F. *et al.* Redes neurais artificiais na predição da produtividade de milho e definição de sítios de manejo diferenciado por meio de atributos do solo. **Bragantia**. Campinas, v. 74, n. 4, p. 436-444, out./dez. 2015.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. Fisiologia da produção de milho. **Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo**. 10p, dez. 2006. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 76).

MANTOVANI, E. C. *et al.* Agricultura de precisão no contexto do sistema de produção: lucratividade e sustentabilidade. **Embrapa Milho e Sorgo, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, Sete Lagoas. n. 209, p. 32, set. 2020.

MOLIN, J. P.; VIEIRA JUNIOR, P. A.; DOURADO NETO, D.; FAULIN, G. D. C.; MASCARIN, L. Variação espacial na produtividade de milho safrinha devido aos macronutrientes e à população de plantas. **Revista Brasileira De Milho E Sorgo**, Sete Lagoas, v. 6, n. 03, p. 309-324, mai. 2010.

OLIVEIRA, P. de; KLUTHCOUSKI, J.; FAVARIN J.L.; SANTOS, D. de C. Sistema Santa Brígida - Tecnologia Embrapa: consorciação de milho com leguminosas. **Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão**. 16p, 2010. (Embrapa Arroz e Feijão. Circular técnica, 88).

OLIVEIRA-PAIVA, C. A. *et al.* Recomendação agronômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho. **Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo**. 18 p, 2020. (Circular Técnica, 260).

PASSOS, F. D. A. *et al.* Produtividade do milho em diferentes populações de plantio. **Revista Cultivando o Saber**, [S. I.], p. 1-11, jan. 2019.

PEREIRA, J. L. A. R. *et al.* Cultivares, doses de fertilizantes e densidades de semeadura no cultivo de milho safrinha. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 3, p. 676-683, jun. 2009.

REIS, E. M.; SEGALIN, M.; MORAES, N. L.; GHISSI, V. C. Efeitos da rotação de culturas na incidência de podridões radiciais e na produtividade da soja. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 40, n. 1, p. 9-15, mar. 2014.

RESENDE, A. V. de; COELHO, A. M.; SANTOS, F. C. dos; LACERDA, J. J. de J. Fertilidade do solo e manejo da adubação NPK para alta produtividade de milho no Brasil Central. **Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo**. 12 p, 2012. (Circular Técnica, 181).

RODRIGUES, M. A. de C. *et al.* Adubação com KCl revestido na cultura do milho no Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, p. 127-133, fev. 2014.

ROLIM, J. I. M.; NICOLAU, F. E. A.; MOTA, A. M. D.; PINTO, A. A.; CAMARA, F. T. Desenvolvimento e produtividade do milho em sistema de plantio no Cariri cearense. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 27, p. 122-131, mar./abr. 2019.

SANGOI, L. *et al.* Estratégias de manejo do arranjo de plantas visando otimizar a produtividade de grãos do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 18, n. 1, p. 47-60, 2019.

SANGOI, L.; SCHMITT, A.; VIEIRA, J.; PICOLI JR., G. J.; SOUZA, C. A. D.; CASA, R. T.; SCHENATTO, D. E.; GIORDANI, W.; BONIATTI, C. M.; MACHADO, G. C.; HORN, D. Variabilidade na distribuição espacial de plantas na linha e rendimento de grãos de milho. **Revista Brasileira De Milho E Sorgo**, Sete Lagoas, v. 11, n. 3, p. 268–277, mai. 2013.

SANGOI, L.; SCHMITT, A.; ZANIN, C. G. Área foliar e rendimento de grãos de híbridos de milho em diferentes populações de plantas. **Revista Brasileira De Milho E Sorgo**, Sete Lagoas, v. 6, n. 03, mai. 2010b.

SANGOI, L. *et al.* Uniformidade no desenvolvimento e resposta de cultivares de milho ao incremento na população de plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 8, n. 01, mai. 2010a.

SANGOI, L.; SILVA, P. R. F. Estratégias de manipulação do arranjo de plantas e desempenho agrônômico do milho. In: WORDELL FILHO, J. A.; CHIARADIA, L. A. (Org.). **A cultura do milho em Santa Catarina**. 3. ed. Florianópolis: Epagri, 2016. v. 1, p. 85-121.

SANTOS, A. L. F.; MECI, I. A.; RIBEIRO, L. M.; CECCON, G. Eficiência fotossintética e produtiva de milho safrinha em função de épocas de semeadura e populações de plantas. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 5, n. 4, p.52-60, out./dez. 2018.

SICHOCKI, D.; GOTT, R. M.; FUGA, C. A. G.; AQUINO, L. A.; RUAS, R. A. A.; MARQUES PAULA NUNES, P. H. Resposta do milho safrinha à doses de nitrogênio e de fósforo. **Revista Brasileira De Milho E Sorgo**, Sete Lagoas, v. 13, n. 1, p. 48–58, jul. 2014.

SILVA, D. H. R. da; MENEGHELLO, G. E.; OLIVEIRA, S. de; CAVALCANTE, J. A.; TUNES, L. M. População de plantas e desempenho produtivo de híbridos de milho oriundos de sementes com diferentes níveis de vigor. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 01–04, abr. 2016.

SILVA, P. R. F.; PIANA, A. T.; MASS, L.; SERPA, M. S.; SANGOI, L.; VIEIRA, V. M.; ENDRIGO, P. C.; JANDREY, D. B. Adequação da densidade de plantas à época de semeadura em milho irrigado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 9, n. 1, p. 48-57, jan./jun. 2010.

SIMAO, E. D. P.; RESENDE, ÁLVARO V.; GONTIJO NETO, M. M.; BORGHI, E.; VANIN, ÁLISSON. Resposta do milho safrinha à adubação em duas épocas de semeadura. **Revista Brasileira De Milho E Sorgo**, Sete Lagoas, v. 17, n. 1, p. 76–90, 2018.

SHIMIZU, G. D.; MARUBAYASHI, R. Y. P.; GONÇALVES, L. S. A. AgroR: Experimental Statistics and Graphics for Agricultural Sciences. R package version 1.3.6. 2024. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/AgroR/index.html> Acesso em: 10 fev. de 2024.

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Estadual Paraná. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2017.

SPAGNOLLO, E.; WORDELL FILHO, J. A.; NESI, C. N. Produtividade, incidência de podridões de colmo e qualidade de grãos de milho cultivados sob diferentes arranjos espaciais e densidades de plantas. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 15, n. 2, p. 109–117, ago. 2016.

TAKASU, A. T. *et al.* Características agronômicas da cultura do milho em função do preparo de solo e arranjo espacial de plantas. **Agrarian**, Dourados, v. 7, n. 26, p. 485-495, abr. 2014b.

TAKASU, A. T. *et al.* Desempenho agronômico do milho sob diferentes arranjos populacionais e espaçamento entrelinhas. **Agrarian**, Londrina, v. 7, n. 23, p. 34–41, dez. 2013.

TAKASU, A. T.; HAGA, K. I.; RODRIGUES, R. A. F.; ALVES, C. J. Produtividade da cultura do milho em resposta a adubação potássica. **Revista Brasileira De Milho E Sorgo**, Sete Lagoas, v. 13, n. 2, p. 154–161, OUT. 2014a.

VELOSO, C. A. C.; CARVALHO, E. J. M.; SILVA, A. R.; FILHO, A. S.; SOUZA, F. R. S. de. Manejo da adubação nitrogenada no cultivo do milho sob sistema de plantio direto em diferentes densidades de semeadura. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 6, n. 10, p. 82467–82477, out. 2020.

VIAN, A. L. *et al.* Variabilidade espacial da produtividade de milho irrigado e sua correlação com variáveis explicativas de planta. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 46, p. 464-471, mar. 2016.

VIEIRA, M. de A. *et al.* Cultivares de milho e população de plantas que afetam a produtividade de espigas verdes. **Acta Scientiarum. Agronomy**. Maringá, v. 32, p. 81-86, mar. 2010.

VILELA, M. de F. *et al.* Mapeamento preliminar de zonas de manejo em sistema de produção de milho-soja no Cerrado. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. de C. (Ed.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Instrumentação. p. 189-193, mar. 2011.

VITORAZZI, C.; AMARAL JÚNIOR, A. T.; CANDIDO, L. S.; FREITAS, I. L. D. J.; SILVA, T. R. D. C. Arranjo populacional para a variedade uenf-14 de milho pipoca. **Revista Brasileira De Milho E Sorgo**, Sete Lagoas, v. 16, n. 3, p. 401–413, dez. 2017.

ZHANG G, SHEN D, MING B, XIE R, HOU P, XUE J, WANG K, LI S. Optimizing planting density to increase maize yield and water use efficiency and economic return in the arid region of northwest China. **Agriculture**, [S. l.], v. 12, n. 9, p. 1322, ago. 2022.

ZOZ, T. *et al.* Densidade Populacional, Espaçamento E Adubação Nitrogenada Na Semeadura De Milho De Segunda Safra. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 103–125, fev. 2019.

ZUCARELI, C. *et al.* Densidade de plantas e adubação nitrogenada em cobertura no desenvolvimento e desempenho produtivo do milho. **Revista Brasileira De Milho E Sorgo**, Sete Lagoas, v. 18, n. 2, p. 178–191, dez. 2019.