

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA**

Jaqueline Brassica Meira da Silva

**Efeito de fertilizante a base de silício e níquel na
tolerância de plantas de milho ao estresse térmico,
avaliado por meio de imagens**

Dracena

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA

Jaqueline Brassica Meira da Silva

**Efeito de fertilizante a base de silício e níquel na
tolerância de plantas de milho ao estresse térmico,
avaliado por meio de imagens.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Ciências Agrárias e
Tecnológicas – Unesp, Câmpus de Dracena
como parte das exigências para graduação em
Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Simões Tomaz

Dracena

2025

certificado de aprovação.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Dracena



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
UNESP – CÂMPUS DE DRACENA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: "Efeito de fertilizante a base de silício e níquel na tolerância de plantas de milho ao estresse térmico, avaliado por meio de imagens"

Modalidade: Atividades de pesquisa.

Autor: Jaqueline Brassica Meira da Silva

Orientador (a): Dr. Rafael Simões Tomaz

Co-orientador(es):

Número de Créditos: 12

Data da aprovação e correção de acordo com as sugestões da Banca: 07/11/2025

Dr. Rafael Simões Tomaz

Dr. Wagner do Nascimento

Dra. Pâmela G. N. Freitas

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às minhas irmãs, por acreditarem no meu sonho com força e amor incondicional e a todos que direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente à vida, tecida por conexões invisíveis que unem tudo o que existe, orientaram meu caminho e me guiaram até este momento.

À minha família, pelo apoio e amor, especialmente às minhas irmãs Grazielle, Gabriela e Stefane, por estarem sempre presentes com amor e força.

Aos meus amigos de infância Rafaela, Lucas, Marthius, Júlia e Íris por serem a minha segunda família. E a todos os outros amigos que fiz ao longo desta jornada, pela amizade, companheirismo e afeto ao longo desta caminhada.

Ao meu orientador Rafael, por acreditar em mim e toda paciência ao me guiar com sabedoria.

À minha orientadora Pâmela, mulher que admiro pela força, sensibilidade e pelas palavras de acalento que sempre me amparou.

Aos professores, por todo o conhecimento compartilhado, que me permitiu crescer não apenas como profissional, mas também como ser humano.

À FCAT, por buscar constantemente proporcionar as melhores condições de aprendizado e oportunidades.

E, por fim, a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a minha formação pessoal e profissional.

RESUMO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas agrícolas mais relevantes em escala global, devido à sua ampla versatilidade de utilização, que inclui alimentação humana, animal e produção de biocombustíveis. Em um cenário desafiador para a agricultura, marcado pelo aumento da frequência de eventos climáticos extremos, torna-se cada vez mais necessário buscar alternativas que mitiguem esses impactos ambientais na produção agrícola. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação foliar de bioestimulantes à base de níquel, silício e micronutrientes no processo de mitigação do estresse térmico gerado por altas temperaturas. Além disso, buscou-se avaliar o efeito desses tratamentos por meio de ferramenta de visão computacional associada ao método de fenotipagem de alto rendimento. O experimento foi instalado na área experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas (FCAT/UNESP), em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico de textura arenosa, utilizando o híbrido precoce MG 540 PWU sob delineamento de blocos casualizados com quatro repetições, em esquema fatorial duplo 4 x 4. Foram avaliados dois fatores: aplicação de silício (solução com 12% de Si e 12% de K₂O) e aplicação de níquel (NiSO₄.6H₂O), cada um com quatro níveis: testemunha (sem aplicação), metade da quantidade recomendada, quantidade recomendada e o dobro da quantidade recomendada, aplicados com a planta em estágio fenológico V6. Além disso, foram incluídos dois tratamentos adicionais utilizando o produto RECOVERY da Bience Agriscience (solução de N – 1,5%; Mg – 3,0%; Zn – 1,5%; Mn – 1,5%; Fe – 0,75% e Se – 0,1%) em dois períodos de desenvolvimento da cultura, em V6 e em R1. Os resultados mostraram efeito significativo dos tratamentos com Si e Ni sobre atributos de produtividade no milho, incluindo comprimento, diâmetro, número de fileiras e grãos em três fileiras na espiga. Já os tratamentos com Recovery apresentaram médias estatisticamente iguais à média geral do experimento. O método de fenotipagem de alto rendimento, por meio de algoritmo de visão computacional, apresentou resultados significativos ($R^2 = 0,68$) aplicado ao processo de mensuração de grãos das espigas, o que pode acelerar o processo de fenotipagem.

Palavras chaves: *Zea mays*, computer vision, micronutrientes, bioestimulantes, estresse abiótico.

ABSTRACT

Maize (*Zea mays* L.) is one of the most important agricultural crops worldwide due to its wide range of uses, including human and animal nutrition as well as biofuel production. In an agricultural context increasingly challenged by the growing frequency of extreme climatic events, it has become essential to seek alternatives that help mitigate the environmental impacts on crop production. This study aimed to evaluate the effect of foliar application of biostimulants based on nickel, silicon, and micronutrients in mitigating heat stress caused by high temperatures. Additionally, the study assessed the effects of these treatments using a computer vision tool associated with a high-throughput phenotyping method. The experiment was conducted in the experimental area of the School of Agricultural and Technological Sciences (FCAT/UNESP), in a dystrophic sandy-textured Red-Yellow Argisol, using the early-cycle hybrid MG 540 PWU (Morgan Seeds) under a randomized block design with four replications in a 4 × 4 factorial scheme. Two factors were evaluated: silicon application (solution containing 12% Si and 12% K₂O) and nickel application (NiSO₄·6H₂O), each with four levels—control (no application), half the recommended dose, the recommended dose, and twice the recommended dose. In addition, two extra treatments were included using the product RECOVERY (Bience Agriscience), composed of N – 1.5%, Mg – 3.0%, Zn – 1.5%, Mn – 1.5%, Fe – 0.75%, and Se – 0.1%, applied at two crop growth stages. The results showed significant effects of Si and Ni treatments on maize yield components, including ear length, ear diameter, number of kernel rows, and number of kernels in three rows of the ear. Meanwhile, the Recovery treatments presented means statistically similar to the overall experiment mean. The high-throughput phenotyping method, using a computer vision algorithm, showed significant performance ($R^2 = 0.68$) for measuring kernels on maize ears, demonstrating its potential to accelerate phenotyping processes.

Keywords: *Zea mays*, computer vision, micronutrients, biostimulants, abiotic stress.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.1 Objetivos Específicos	15
3 REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1 Aspectos gerais e socioeconômicos da cultura	16
3.1.1 Estresse térmico	18
3.1.2 Bioestimulante	21
3.1.3 Micronutrientes	24
3.1.4 Fenotipagem por meio de avaliações de imagens	27
4 MATERIAL E MÉTODOS	29
4.1 Área experimental, material genético e características avaliadas	29
4.2 Fenotipagem de Alto Rendimento com Drone	34
4.3 Fenotipagem por Visão computacional	34
4.4 Análise Estatística dos Dados	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1 Anova	36
5.2 Avaliação com drone	42
5.3 Visão computacional	43
6 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas agrícolas de maior importância econômica e social, sendo amplamente cultivado em diversas regiões do mundo devido à sua versatilidade e elevado potencial produtivo. No Brasil, o cereal é fundamental para o abastecimento interno e para o mercado de exportação, integrando cadeias produtivas voltadas à alimentação humana, animal e industrial. Entretanto, a produtividade da cultura é fortemente influenciada pelas condições ambientais, especialmente pela ocorrência de estresses abióticos como altas temperaturas e déficit hídrico, que afetam o crescimento e o desenvolvimento das plantas em diferentes estádios fenológicos.

O aumento da frequência e da intensidade das ondas de calor, resultado das mudanças climáticas globais, tem intensificado os desafios relacionados à sustentabilidade dos sistemas agrícolas. A elevação da temperatura média, principalmente durante as fases reprodutivas, interfere em processos fisiológicos essenciais, reduzindo a fertilidade, o enchimento dos grãos e, consequentemente, o rendimento das lavouras. Diante desse cenário, a adoção de estratégias de manejo nutricional capazes de aumentar a tolerância das plantas ao estresse térmico tem se mostrado uma alternativa promissora.

Entre as tecnologias emergentes, destacam-se o uso de bioestimulantes e elementos, como o silício e o níquel, que atuam em vias metabólicas relacionadas à absorção de nutrientes, equilíbrio hormonal e defesa antioxidante. A aplicação conjunta desses elementos pode induzir mecanismos fisiológicos de proteção e contribuir para o desempenho produtivo em condições adversas.

O desenvolvimento de métodos precisos para avaliar o comportamento das plantas frente ao estresse térmico é essencial para validar o efeito desses tratamentos. Nesse contexto, a fenotipagem por imagem surge como uma ferramenta eficiente, permitindo a quantificação de características morfológicas e produtivas de forma não destrutiva, com maior precisão e rapidez na obtenção dos dados. Desta forma, o aprimoramento de estratégias de otimização do manejo nutricional, aliado a metodologias avançadas de análise de dados, representa uma abordagem inovadora para compreender e melhorar a tolerância das plantas ao estresse térmico, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de produção mais sustentáveis e adaptados às novas condições climáticas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a tolerância de plantas de milho ao estresse térmico quando tratadas com nutrientes e bioestimulantes.

2.1 Objetivos Específicos

- Avaliar o efeito da aplicação foliar de nutrientes a base de silício e níquel e bioestimulantes na mitigação do estresse térmico gerado por altas temperaturas.
- Realizar fenotipagem de alto rendimento para caracteres de produção e desenvolvimento vegetativo e relacionar com o efeito dos tratamentos por meio de ferramentas de visão computacional.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Aspectos gerais e socioeconômicos da cultura

A domesticação do milho (*Zea mays*) representa um marco crucial na história da agricultura. Com origem no México há 9.000 anos, a cultura foi disseminada no sudoeste da Amazônia a cerca de 6.000 anos, constituindo a base da alimentação para as antigas civilizações, desde então se expandiu globalmente como alimento básico e essencial em diversas culturas (Costa, 2024).

A combinação entre seleção natural e a intensa seleção humana viabilizou desenvolvimento de atributos de produtividade, assim como uma intensa variabilidade genética tornando possível a espécie adquirir características adaptativas aos mais variados ambientes, compondo diferentes sistemas de produção. Esses fatores contribuíram para que, atualmente o cereal seja cultivado em quase todas as regiões do planeta, sendo possível observar a ampla gama de utilizações em diferentes setores, tanto na indústria alimentícia quanto no setor de medicamentos, bebidas, indústria de celulose e papel, formulação de rações e produção de biocombustíveis (Strazzi, 2015).

A versatilidade desta planta influenciou inovações nas práticas agrícolas, sendo a variabilidade atributo essencial principalmente em programas de melhoramento genético com o desenvolvimento de cultivares e híbridos. Segundo Fritsche Neto e Moro (2015), a seleção da cultivar corresponde a 50% da eficiência produtiva no campo, mostrando-se um desafio complicado, mas essencial, considerando, no momento da escolha, fatores inerentes ao clima, ao solo e ao sistema de produção, especificamente ao grau tecnológico empregado e a destinação da produção final, que pode atender diferentes segmentos de mercado.

No Brasil, o cereal é cultivado principalmente em dois diferentes sistemas de produção: a primeira safra ou safra de verão é realizada durante a época das águas, entre os meses de agosto e dezembro dependendo das condições edafoclimáticas de cada região. Já a segunda safra, denominada safrinha constitui a produção em sequeiro, com o plantio entre os meses de janeiro e fevereiro, em sistemas convencionais tradicionais, logo após a colheita da soja (Filho *et al.*, 2021). Porém desde 2019, os dados indicam um crescimento anual de uma terceira safra, caracterizada por um plantio mais tardio, realizado entre os meses de abril e junho, e

predominantemente concentrada nas regiões Norte e Nordeste do país (Stonex, 2022).

A segunda safra, apesar de não ser considerada a principal, tem ganhado destaque nas últimas décadas devido aos sucessivos aumentos na produção e na produtividade, tornando-se, atualmente, a principal responsável pela oferta de milho no país. Esse processo de reestruturação do mercado atingiu seu ápice na safra 2011/2012, quando a produção e a área cultivada da segunda safra dobraram em relação à anterior, superando, pela primeira vez, a produção da safra de verão (Contini *et al.*, 2019).

Para Barros e Alves (2015), essa transformação só foi possível graças ao aumento do consumo interno, pela geração de excedente na produção doméstica que ampliaram as oportunidades de exportação e pelo aprimoramento das técnicas empregadas no campo associado ao avanço tecnológico que abriu oportunidades para ajustes no manejo.

Para o ano agrícola 2024/2025, estima-se uma produção de 94.631,3 mil toneladas de milho na segunda safra, com incremento na produtividade de 5491 kg/ha para 5702 kg/ha, em uma área cultivada de aproximadamente 16,60 milhões de hectares, o que representa um crescimento de cerca de 1% em relação à safra anterior (Conab, 2025)

Entretanto, apesar da maior representatividade na produção e do crescimento contínuo, a safrinha ainda é considerada de maior risco em comparação à safra de verão, devido às condições ambientais imprevisíveis e ao fato do desenvolvimento da cultura ocorrer em um período crítico, marcado por estresses abióticos relacionados à menor disponibilidade de água em grande parte das regiões produtoras (Souza; Barbosa, 2015).

Embora a safrinha tenha se tornado mais expressiva, a safra principal ainda representa uma parcela significativa da produção, garantindo competitividade ao longo de todo o ano. De acordo com levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento – Conab (2025) para a primeira safra do ano agrícola 2024/2025 a estimativa é a de que tenham sido produzidas 22.533,7 mil toneladas de milho, com um aumento significativo na produtividade, que passou de 5784 kg/ha para 6062 kg/ha, com redução de 6,4% na área cultivada, que passou de 3,97 milhões de hectares para 3,72 milhões de hectares em relação à safra anterior. De maneira geral, nesta safra, a cultura se desenvolveu em um ambiente favorável em relação a

disponibilidade de água; no entanto, sofreu com estresses abióticos ligados ao aumento de temperatura e intensa incidência luminosa que, de acordo com Souza e Barbosa (2015), podem ser prejudiciais ao desenvolvimento da planta.

As mudanças climáticas têm intensificado a ocorrência de eventos climáticos extremos, impactando diretamente os sistemas de produção agrícola. As alterações no clima e na temperatura da superfície terrestre já afeta todo o planeta e são, em grande parte, consequência das atividades humanas, intensificando fenômenos como o aquecimento global e a acidificação dos oceanos, representando ameaças econômicas, sociais e ambientais (IPCC, 2021). A agricultura depende diretamente das interações com o meio ambiente e dos seus recursos naturais, sendo particularmente vulnerável a alterações significativas do clima (FAO, 2021).

Segundo dados do relatório das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), a agropecuária foi o segundo setor que mais emitiu gases de efeito estufa em 2020, representando aproximadamente 28,5% das emissões totais, o que corresponde a 477,67 milhões de toneladas de CO₂, fica atrás apenas do setor LULUCF (Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas), que foi responsável por 38,0% das emissões totais, cerca de 637,04 milhões de toneladas de CO₂, setor que contabiliza as emissões relacionadas ao desmatamento de biomas como o Cerrado e a Amazônia.

Diante desse cenário, a produção mundial de alimentos e a segurança alimentar passam por uma ameaça, uma vez que as plantas são sensíveis às variações de temperatura do ar e aos diferentes níveis de CO₂ na atmosfera (Cintra *et al.*, 2020). Soma-se a isto a intensificação de estresses de natureza biótica como surtos de pragas e doenças, e de natureza abióticos tais como a ocorrência de secas prolongadas, ondas de calor, precipitações excessivas, tempestades de grande intensidade (incluindo ciclones). Todos estes fatores contribuem para reduções drásticas na produtividade.

3.1.1 Estresse térmico

Desde a década de 1950, são relatados aumentos progressivos nas ondas de calor, que estão mais frequentes, intensas e longas, resultando em um acúmulo de calor ao longo do tempo que intensifica continuamente a elevação da

temperatura global (Perkins-Kirkpatrick; Lewis, 2020). O ano de 2024 foi marcado por um recorde histórico, sendo o mais quente já registrado mundialmente. Na Europa, as temperaturas ficaram 1,57°C acima da média, sendo considerado o segundo agosto mais quente já registrado na região com maior ocorrência de eventos climáticos extremos de calor, seca e enchentes (Copernicus, 2024).

De maneira geral, as culturas respondem de forma diferente ao estresse térmico ao longo de seu ciclo, pois possuem um intervalo crítico de tolerância, sendo particularmente vulneráveis durante a fase reprodutiva, que quando coincide com altas temperaturas causam danos significativos. Em gramíneas, a faixa de temperatura crítica tem uma amplitude maior (30-38°C) em relação as oleaginosas (35-36°C), indicando que nessas culturas a reprodução é particularmente mais sensível a pequenas variações de temperatura (Vara Prasad *et al.*, 2015).

As culturas de grãos são diretamente afetadas pelo calor, uma vez que a produtividade está diretamente relacionada ao funcionamento das estruturas reprodutivas. O estresse térmico promove uma série de alterações metabólicas como a desnaturação de proteínas e inativação de enzimas prejudicando processos fisiológicos vitais das plantas. Prasad *et al.* (2015) relataram que, quando o estresse térmico ocorre próximo à antese e durante o início do enchimento dos grãos, há redução significativa da fertilidade das flores de sorgo granífero e diminuição do peso individual dos grãos. Em plantas de milho ceroso, temperaturas acima de 35°C após a polinização impactaram negativamente o rendimento e a qualidade dos grãos, devido à redução da atividade enzimática envolvida na síntese de sacarose e amido, resultando em menor acúmulo de reservas e grãos de menor massa (Yang *et al.*, 2018)

As mudanças climáticas têm reduzido a amplitude térmica diária, principalmente em função do aumento da temperatura noturna. Noites mais quentes aumentam a taxa de respiração das plantas, promovendo maiores perdas de carbono, interferindo no acúmulo de açúcares, reduzindo a síntese de amido e comprometendo a qualidade dos grãos (Bahuguna *et al.*, 2016)

O estresse térmico pode ser estudado por meio de ferramentas tecnológicas modernas, como modelos de simulação agrícola e técnicas de aprendizagem de máquinas como as Redes Neurais Artificiais (RNA ou ANN), ainda, esses modelos podem ser combinados em um modelo híbrido “hybrid modeling” para fornecer previsões mais precisas e aprimorar sua aplicabilidade na análise de variáveis

agronômicas. Modelos recentes estão sendo aprimorados para melhorar a acurácia e evitar subestimação de dados. Sun *et al.* (2022) integraram dois algoritmos de estresse térmico ao modelo CERES-Rice, tradicionalmente usado para simular o crescimento do arroz. A adição desses módulos aumentou a precisão do modelo, corrigindo erros e gerando resultados mais próximos dos dados observados, representando melhor os efeitos do calor na produção de grãos. Além disso o novo modelo pode ser testado em cenários futuros inferindo os impactos da temperatura na produção de arroz na China. A fenotipagem de alto rendimento surge como uma ferramenta complementar ao integrar tecnologias de sensoriamento remoto, que permitem inferir uma grande quantidade de informações por meio da análise de imagens. Essa abordagem reduz a dependência de dados experimentais exigidos tradicionalmente pelos modelos de simulação substituindo medições manuais susceptíveis a erros humanos aumentando a confiabilidade das previsões.

Assim, a compreensão de como o calor impacta os sistemas produtivos é essencial para o desenvolvimento de cultivares adaptadas e para o uso de tecnologia de monitoramento mais precisas.

3.1.2 Bioestimulantes

A aprovação da Lei nº 15.070, de 23 de dezembro de 2024, estabeleceu um marco regulatório específico para os bioinsumos, enquadrando-os em uma categoria própria, redefinindo assim o conceito de bioestimulantes. A regulamentação do uso revoga disposições anteriores como as previstas na Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que anteriormente enquadrava os bioinsumos, incluindo os bioestimulantes, em normativas voltadas para agrotóxicos e fertilizantes, o que limitava seu desenvolvimento e adequação às necessidades dos diferentes sistemas de produção. A partir da nova lei estão incluídos na disposição:

Todos os bioinsumos utilizados na atividade agropecuária, incluídos os bioestimuladores ou inibidores de crescimento ou desempenho, semioquímicos, bioquímicos, fitoquímicos, metabólitos, macromoléculas orgânicas, agentes biológicos de controle, condicionadores de solo, biofertilizantes e inoculantes (BRASIL, 2024)

Segundo o PROGRAMA NACIONAL DE BIOINSUMOS (PNB), bioestimulantes são substâncias naturais utilizadas no tratamento de sementes, diretamente nas plantas ou no solo, com objetivo de melhorar os processos fisiológicos, a absorção de nutrientes, regular o balanço hormonal e aumentar a eficiência produtiva das plantas. São classificadas em nove tipos distintos de compostos que atuam de maneira específica, sendo os mais relevantes: compostos húmicos, resíduos sólidos urbanos e industriais, elementos benéficos, macroalgas marinhas, além de microrganismos incluindo rizobactérias e fungos (Garcia-Sanchez *et al.*, 2022)

A versatilidade nas composições dos bioestimulantes permite sua atuação por meio de diversos mecanismos de ação, possibilitando ainda explorar sua aplicação por diferentes métodos, adequando-se as necessidades específicas da cultura e do ambiente. Os estudos avaliam seu efeito particularmente sobre as relações de absorção e perda de água, a eficiência nutricional, e o crescimento radicular e vegetativo, além da ativação de genes que atuam em vias metabólicas específicas em resposta a condições de estresse.

A eficiência na absorção de água e nutrientes, por exemplo, depende, dentre outros fatores, do volume de solo explorado pela raiz. Assim, um sistema radicular mais desenvolvido, que se estende em profundidade e possua uma estrutura mais fina com alta emissão de ramificações é mais resistente a períodos de baixa disponibilidade de água no solo (Pes; Arenhardt, 2015).

O potencial efeito dos bioestimuladores sobre o desenvolvimento do sistema radicular foi avaliado por Costa *et al.* (2024), ao tratar sementes de milho com diferentes doses de um produto a base de zinco, óxido de potássio e carbono orgânico, observando maior massa e volume de raízes em todos os tratamentos, com incrementos de até 40% em relação a testemunha, destacando ainda que em nenhuma das doses o vigor e a capacidade de germinação foram afetados. Resultados semelhantes foram constatados por Corrêa (2020) ao tratar sementes de tomate com um produto a base de macro e micronutrientes, evidenciando respostas fisiológicas positivas principalmente no aumento da área vegetativa e do comprimento radicular.

Técnicas inovadoras comumente são desenvolvidas com o objetivo de aprimorar a produção e comercialização de sementes de alta qualidade. A resposta fisiológica do vegetal permite selecionar variedades com potencial de estabelecimento

rápido e uniforme mesmo que sob a grande variação ambiental a que são submetidas as sementes após a semeadura, possibilitando visualizar de forma rápida a manifestação da viabilidade e do vigor (Filho, 2006).

Além de influenciar as características morfofisiológicas, os bioestimulantes também favorecem alterações em atributos químicos. Porras *et al.* (2025), estudando a cultura da alface e avaliando uso de um bioestimulante produzido de resíduos vegetais e inoculado com o fungo *Trichoderma harzianum*, sob diferentes regimes de irrigação demonstrou resultados significativos em características como altura, peso fresco e crescimento, e em atributos químicos como a qualidade nutricional e a atividade antioxidante.

Outros métodos de aplicação como o tratamento foliar e/ou a pulverização no sulco também são explorados. Bertolin *et al.* (2010), avaliou tanto a aplicação foliar quanto o tratamento de sementes com hormônios vegetais em soja, verificando que independentemente do método utilizado, houve aumento no número de vagens e na produtividade de grãos, sendo de aproximadamente 40% para o tratamento de sementes e 37% para a aplicação foliar, de modo mais efetivo quando os tratamentos são realizados no florescimento da cultura. Neto *et al.* (2014) avaliou o mesmo bioestimulante nas culturas do milho e do feijão, testando diferentes doses e métodos de aplicação. Para a cultura do milho independente da dose houve aumento significativo no diâmetro do colmo, resultado associado a ação dos hormônios que estimulam a diferenciação e a multiplicação celular, tornando as plantas mais resistentes ao acamamento e a danos mecânicos, além de identificar que o tratamento de sementes e a aplicação no sulco proporcionam maior número de grãos por fileira e conseqüentemente maior número de grãos por espiga, devido ao maior tempo de contato do produto, atuando no metabolismo desde as fases iniciais de desenvolvimento.

Sem dúvidas, as diferentes composições dos bioestimulantes ensejam diversas oportunidades de utilização, possibilitando sua adequação ao cultivo de diferentes culturas. Inicialmente o seu uso estava restrito somente ao cultivo orgânico de hortícolas de alto valor, porém atualmente a aplicação já se estende para a produção de grandes culturas em sistemas convencionais, atribuindo parâmetros de sustentabilidade para esse tipo de produção (Buono, 2021).

Em 2023, o mercado de bioestimulante movimentou cerca de US\$ 2974 bilhões, com projeções crescentes para os próximos anos, impulsionado

principalmente pela possibilidade de um manejo mais sustentável e pela redução do uso de fertilizantes, cenário que, no Brasil, se destaca em função da produção intensiva e da diversidade de culturas produzidas, sendo um setor ainda em fases iniciais, mas promissor, cuja expansão tem sido favorecida a partir da regulamentação legislativa desse segmento (CEPEA, 2024).

3.1.3 Micronutrientes

Apesar de serem exigidos em menores quantidades em comparação aos macronutrientes, os micronutrientes desempenham papel essencial na nutrição das plantas. Os elementos estão intimamente relacionados ao desempenho de rotas metabólicas e bioquímicas com efeito direto em processos fisiológicos (Epstein, 2006)

O solo representa a principal fonte de obtenção desses nutrientes; contudo, sua variabilidade resultante da interação dinâmica entre os fatores de formação do solo, influencia a disponibilidade e a absorção dos elementos pelas plantas. Dessa forma, os solos apresentam limitações na capacidade de fornecer nutrientes as culturas. Os teores totais dos nutrientes no solo não indicam sua real disponibilidade, estando esta dependente de outros fatores, como a mineralização da matéria orgânica, o pH, a capacidade de adsorção entre outras condições físico-químicas e biológicas (White; Zasoski, 1999).

A descoberta da essencialidade dos nutrientes é resultado da evolução progressiva das técnicas de análise que permitiu compreender as relações dos elementos com as plantas (Zonta *et al.*, 2006). Assim, com o avanço dos estudos, tornou-se possível classificá-los quanto ao grau de essencialidade para a sobrevivências das espécies vegetais. Arnon e Stout (1939) estabeleceram critérios para essa classificação, dividindo-os em macronutrientes e micronutrientes, e estes últimos em essenciais, benéficos e tóxicos. Atualmente, nutrientes indispensáveis às culturas são ordenados de acordo com sua demanda são: $N > K > Ca > Mg = P = S$, no caso dos macronutrientes; e $Fe > Mn > Zn > B > Cu > Cl > Mo > Ni$, no caso dos micronutrientes (Malavolta, 2006).

Os micronutrientes desempenham funções específicas nas plantas, atuando como constituintes de estruturas orgânicas, compondo grupos prostéticos de enzimas, além da função de ativadores enzimáticos (Malavolta, 2006). Entre essas funções,

destaca-se sua atuação como cofator enzimático, especialmente em oxidoredutases enzimas envolvidas na transferência de elétrons (Sharma, 2006).

Na célula, o níquel (Ni) demonstra papel essencial na atividade e regulação de enzimas, destacando-se como cofator da urease no metabolismo do nitrogênio, como componente de hidrogenases em rizobactérias dos gêneros *Rhizobium* e *Bradyrhizobium* otimizando a energia na FBN e na atividade de enzimas do sistema antioxidante. Gajewska *et al.* (2006) relataram aumento expressivo de enzimas antioxidantes como a peroxidase (POD) e a glutathiona S-transferase (GST) em plantas de trigo tratadas com uma solução de NiSO₄ (sulfato de níquel). De forma semelhante, Hassanuzzaman *et al.* (2012) ao avaliarem a aplicação de óxido nítrico (NO) em mudas de trigo submetidas ao estresse térmico, observaram aumento na produção de GST e de outras enzimas antioxidantes, como a ascorbato peroxidase (APX) e a glutathiona redutase (GR). Além disso, embora algumas enzimas de defesa fossem reduzidas inicialmente em função do estresse o NO mostrou eficácia na restauração da sua atividade.

De forma semelhante, determinados elementos benéficos, como o silício (Si), apresentam mecanismos integrados de resposta a estresses de natureza tanto biótica quanto abiótica, desencadeando simultaneamente efeitos em processos metabólicos de defesa e promovendo a melhoria de características morfológicas e estruturais. As plantas absorvem esse elemento principalmente na forma de ácido monossilícico (H₄SiO₄) (Epstein, 2006). Após ser absorvido, é translocado e redistribuído nos diferentes tecidos vegetais principalmente na epiderme, conferindo maior resistência e flexibilidade a estruturas de sustentação, como colmos e lâminas foliares, acumulando-se principalmente em regiões associadas a perda de água por evapotranspiração (Santos *et al.*, 2021).

A compreensão das vias de sinalização celular que regulam as respostas das plantas ao estresse tem avançado significativamente; contudo, tais mecanismos podem ser explicados pelo desencadeamento de processos metabólicos fundamentais mediados por alterações na expressão gênica, que resultam respostas fisiológicas adaptativas. Entre esses processos destacam-se o equilíbrio na concentração de íons, detoxificação de espécies reativas de oxigênio (ROS), a síntese de osmólitos, a regulação da entrada e saída de água nas células e a sinalização celular a longas distâncias (Hossain *et al.*, 2016). Nesse contexto, descobertas recentes têm confirmado o papel do silício como atenuador de diferentes tipos de

estresses. Em termos bioquímicos, o elemento está associado à redução dos estresses oxidativos gerados da toxidez de nutrientes e ao aumento da eficiência no uso de outros micronutrientes como ferro (Fe), Cobre (Cu) e zinco (Zn) (Alves et al. 2023). Na cultura do milho Rahman *et al.* (2023) constataram que a pulverização foliar de silício melhora as características agronômicas de plantas cultivadas em solos contaminados por metais pesados, por meio da regulação da atividade de enzimas antioxidantes, como as superóxidos dismutases (SODs) e peroxidases (PODs), além da redução dos teores de malondialdeído (MDA) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2). De forma semelhante, em condições de estresse salino, o silício tem se mostrado eficaz na atenuação dos efeitos adversos da salinidade. Plantas de milho cultivadas em solos salino-sódicos apresentaram maior crescimento e disponibilidade de nutrientes essenciais como fósforo (P) e potássio (K), em resposta a aplicação de nanopartículas de silício (NPS-Si). Além disso, observou-se o acúmulo de P em estruturas vegetativas, como raízes e espigas, concomitantemente a melhoria de parâmetros fisiológicos, incluindo o teor de clorofila, taxa fotossintética e transpiração (Rizwan *et al.*, 2023). Outras gramíneas, como o arroz e o milheto, respondem positivamente a adubação silicatada especialmente em solos de baixa fertilidade natural, sendo os silicatos de Ca e Mg eficientes no rendimento das duas culturas e na qualidade dos grãos de arroz em função da maior deposição de silício nos colmos, que reduz os espaços vazios dos grãos elevando sua massa (Chagas *et al.*, 2016)

Além dos efeitos bioquímicos, o silício também é relevante na homeostase hídrica das plantas. Shi *et al.* (2016) constataram que, em plantas de tomate submetidas ao estresse hídrico, o silício aumentou a condutância hidráulica favorecendo a absorção de água pelas raízes, além de reduzir danos oxidativos melhorando a tolerância das plantas a condições de seca. De forma semelhante, em cultivares de cana-de-açúcar sensíveis e tolerantes a deficiência hídrica o silício aumentou o conteúdo relativo de água (CRA) e intensificou a síntese de pigmentos antioxidantes (De Camargo *et al.*, 2019).

As alterações no clima modificam as condições ambientais que favorecem a ocorrência de fitopatógenos, influenciando sua incidência, severidade e distribuição. Esses organismos interferem nos processos fisiológicos das plantas, e se manifestam pela interação entre um hospedeiro susceptível, um patógeno virulento e o ambiente como um fator decisivo (Amorim *et al.*, 2011). Assim, o silício atua também como um agente na mitigação de estresses de natureza biótica, modulando respostas

adaptativas das plantas. Estudos demonstram que, além da resistência mecânica conferida às estruturas de proteção como a parede celular, o silício também intensifica a transcrição de genes das vias fenilpropanóide e terpenóide, rotas metabólicas responsáveis pela síntese de compostos de defesa (Debona *et al.*, 2017). Waterman *et al.* (2021) mostraram que, em apenas 72 horas, a exposição de plantas acumuladoras ao silício reduziu a herbivoria de *Helicoverpa armigera* de forma equivalente à observada em exposições por períodos mais longos, principalmente ao desgastar as mandíbulas das larvas.

3.1.4 Fenotipagem por meio de avaliações de imagens

O processo de fenotipagem é tradicionalmente utilizado na mensuração de diversas variáveis agronômicas, através da análise de características de fácil mensuração, associadas a atributos físicos e estruturais das plantas. As metodologias convencionais baseiam-se em medições manuais realizadas com a ajuda de ferramentas, como paquímetros e balanças. Embora apresentem algumas vantagens, como a facilidade de execução e a dispensa de preparo prévio das amostras, esses métodos apresentam limitações, por vezes devido ao caráter destrutivo do processo, por vezes pelo carácter subjetivo da avaliação (dependência da percepção humana), dentre outros (Sousa, 2014).

Atualmente, abordagens inovadoras têm aprimorado os processos de aquisição e análise de dados, consolidando uma nova linha chamada “fenotipagem digital”, caracterizada por análises mais precisas e em larga escala, realizadas principalmente pela captura de imagens obtidas por diferentes tipos de sensores que operam nas faixas do espectro visível, infravermelho e de fluorescência (Prado, 2023).

A fenotipagem baseada em imagem tem como princípio a extração de informações quantitativas a partir de dados visuais, principalmente por meio de técnicas de aprendizagem de máquina com uso de algoritmos para segmentação de imagens, reconstrução tridimensional (3D), análise de imagens multiespectrais e reconstrução por raio X (University of Nottingham). Ainda, a análise de imagens pode ser melhorada utilizando modelos de inteligência artificial como as redes neurais, que identificam padrões complexos e melhoram a estimativa de características fenotípicas (Santos *et al.*, 2025).

O processamento de imagens pode ser realizado por meio de diferentes linguagens de programação, como Python e R, que oferecem bibliotecas específicas, como OpenCV e Pillow, capazes de preparar as imagens para uma das etapas mais desafiadoras, a segmentação, que consiste no isolamento da região de interesse em relação ao fundo (Billah *et al.*, 2025). Essa etapa é importante para simplificar a imagem bruta em uma representação homogênea, que possibilita agrupar pixels com base nos seus valores de R, G, B e em características similares, como cor, intensidade, textura e comportamento espectral, em segmentos que representem de forma ideal um objeto, possibilitando inferir quais pixels correspondem ao objeto de interesse (foreground) e quais ao fundo da imagem (background). O isolamento de regiões de interesse permite que nas análises subsequentes sejam reconhecidos padrões mais consistentes e precisos, evitando a interferência de regiões irrelevantes e aumentando a eficiência na extração de atributos visuais (Yu *et al.*, 2023). A aplicação dessas técnicas tem sido amplamente explorada em experimentações agrícolas, impulsionada pelos avanços tecnológicos podendo inferir sobre os rendimentos das culturas. Um exemplo é o estudo de Bakshi *et al.* (2025) que desenvolveu um banco de imagens de referência para o reconhecimento e a contagem automatizada de grãos de sorgo, demonstrando o potencial dessas abordagens em análises fenotípicas. Métodos semelhantes baseados em imagens foram testadas em diferentes culturas, incluindo *Arabidopsis thaliana* e *Nicotiana tabacum* (Minervini *et al.*, 2016), arroz (Zheng *et al.*, 2024), trigo (Sankaran *et al.*, 2015), milho (Xiao *et al.*, 2025), laranja-baía (Wang *et al.*, 2025) e uva (Underhill *et al.*, 2020), assim como em estruturas complexas abaixo do solo, como as raízes (Perocho; Concepción, 2025)

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área experimental, material genético e características avaliadas

O experimento foi realizado na Área Experimental irrigada da Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas (UNESP), Campus de Dracena, SP, localizada a 21°29' de latitude Sul e 51°32' de longitude Oeste, com 396 m de altitude. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cw (quente com inverno seco), com temperatura média anual de 24°C e precipitação de 1300 mm.

O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Amarelo distrófico de textura arenosa (SANTOS *et al.*, 2013). Para análise, foram coletadas amostras na profundidade de 0-0,20 m, as quais foram destorroadas, homogeneizadas, secas ao ar e peneiradas em malha de 4 mm. Os atributos físicos e químicos foram determinados conforme a metodologia de Raij *et al.* (2001) com base na análise da fertilidade do solo descrita na tabela 1. Posteriormente, realizou-se a calagem em área total para elevar a saturação por bases a 70%, utilizando o método descrito por Quaggio *et al.* (1985).

Para preparo do solo, foi realizada a operação de aração e gradagem. O experimento foi conduzido em sistema plantio direto sob palhada de *Urochloa brizantha*.

Tabela 1 - Análise de solo do experimento.

pH	g/dm ³	mg/dm ³	mmolc/dm ³							V	m	mg/dm ³					
										%	%						
CaCl ₂	MO	P	K	C	M	A	H+A	SB	T			S	Fe	Mn	Zn	Cu	B
			a	g	l	l											
4,9	9	21	1,1	10	4	1	15	15,9	30,9	51	0	5	17,5	16,5	0,8	2,1	0,15

Fonte: Elaborado pelo autor

O experimento foi instalado em campo em 18 de outubro de 2024, sob delineamento de blocos casualizados com quatro repetições, em esquema fatorial duplo 4 x 4, utilizando a variedade MG 540 PWU. Foi considerado o fator aplicação de silício, com dose recomendada de 2 L ha⁻¹ (solução com 12% de Si e 12% de K₂O), com 4 níveis: 1) testemunha - sem aplicação; 2) ½.x da dose recomendada; 3) dose

recomendada; 4) 2x. da dose recomendada. Adicionalmente, foi considerado o fator aplicação de níquel ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), com dose recomenda de 80 g ha^{-1} também em 4 níveis: 1) testemunha - sem aplicação; 2) $\frac{1}{2} \times$ da dose recomendada; 3) dose recomendada; 4) 2x. da dose recomendada. As aplicações foliares ocorreram no período vegetativo com as plantas em estágio fenológico V6, em cinco de dezembro 47 DAS. Como ilustrado na Figura 1.

Além disso, dois tratamentos adicionais foram incluídos, consistindo na aplicação do produto RECOVERY (solução de N – 1,5%; Mg – 3,0%; Zn – 1,5%; Mn – 1,5%; Fe – 0,75% e Se – 0,1%) também via foliar; porém em dois diferentes períodos de desenvolvimento: vegetativo em V6 (Tratamento Adicional 1) e reprodutivo em R1 (Tratamento Adicional 2). Para este também foram considerados 4 níveis: 1) testemunha - sem aplicação; 2) $\frac{1}{2} \times$ da dose recomendada ($1,25 \text{ ml}$); 3) dose recomendada (1 L ha^{-1}); 4) 2x. da dose recomendada ($5,0 \text{ ml}$).

Figura 1. Aplicação foliar dos tratamentos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A unidade experimental foi composta por sete linhas de quatro metros, com as três linhas centrais de três metros sendo avaliadas. A semeadura foi realizada com uma semeadora adubadora configurada para plantio direto, com sete linhas espaçadas em $0,52 \text{ m}$ e reguladas para uma população final de cinco plantas por metro. A colheita ocorreu em 25 de fevereiro de 2025 quando os grãos já se

encontravam em estágio de desenvolvimento farináceo-duro, com a linha do leite avançada na maioria dos grãos, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2. Corte transversal de espiga de milho no estágio farináceo-duro, evidenciando a linha do leite avançada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As características avaliadas incluíram altura de inserção da espiga (H_e – em m), mensuradas em cinco plantas tomadas ao acaso na área útil da parcela, com auxílio de trena. Além disso, foram mensuradas comprimento da espiga (C_e - em cm) (Foto 3), diâmetro de espiga, na porção média (D_e – em cm) (Foto 4), número de fileiras de grãos (N_f), número de grãos em três fileiras (G_{3f}), mensuradas em dez espigas tomadas aleatoriamente dentro da parcela útil; massa de 100 grãos (MCG, expressa em kg ha^{-1}) e a produtividade de grãos (P_g , expresso em kg ha^{-1}) a 13% de umidade, após a colheita manual das plantas e trilha mecânica das espigas, conforme ilustrado nas fotos 5 e 6.

Figura 3. Avaliação do comprimento da espiga (Ce) de milho utilizando régua milimetrada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4. Mensuração do diâmetro da espiga (De) em milho com auxílio de paquímetro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5 – Avaliação da umidade dos grãos de milho por meio do determinador eletrônico G650i, utilizada para padronização da produtividade a 13% de umidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6. Processo de trilha mecânica das espigas de milho para obtenção da produtividade.

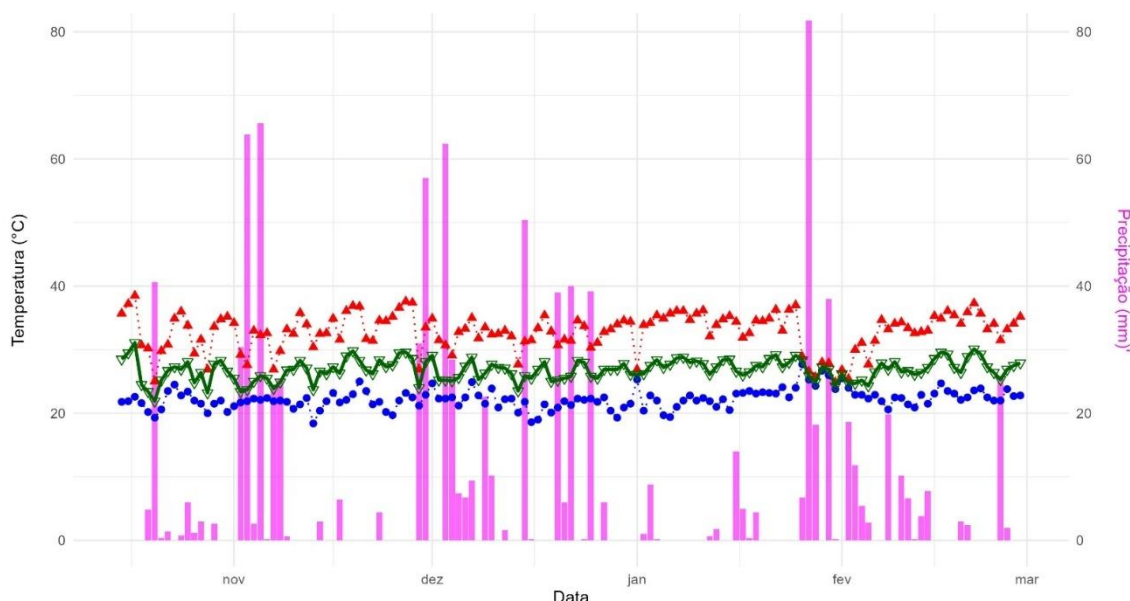


Fonte: Elaborado pelo autor.

O manejo da irrigação foi realizado baseado na evapotranspiração de referência (ET_o) obtidas a partir da Estação Meteorológica Campbell Scientific CR10X, estimada pelo método de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998) e multiplicado pelo coeficiente da cultura (K_c) das fases fenológicas da cultura. Foi utilizado o sistema de irrigação por aspersão convencional, composto de 2 linhas com 6 aspersores da marca Fabrimar espaçados 12x12 m entre as linhas, lâmina de 7,0 mm/h, PS de 20 mca e turno de rega de 4 dias. Os dados de temperatura e precipitação durante o período de experimentação estão apresentados na Figura 7.

A análise de dados foi realizada por meio de rotinas desenvolvidas em linguagem R (R Core Team, 2024). Foi procedida análise de variância (ANOVA) seguida de teste de comparação de médias para identificar diferenças significativas entre os tratamentos.

Figura 7. Dados da temperatura mínima (azul), máxima (vermelho), média (verde) e da precipitação durante o período de condução do experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Fenotipagem de Alto Rendimento com Drone

Foi realizada fenotipagem de alto rendimento da aquisição de imagens aéreas com um drone Mavic 2 Pro com sua câmera nativa 4K 60 fps. Foram realizados vôos periódicos, a cada 15 dias após a semeadura, à altura de 25-30 metros, durante todo o período de desenvolvimento da cultura. A criação dos ortomosaicos foi realizada por meio do software OpenDroneMap.

4.3. Fenotipagem por Visão computacional

Foram tomadas 180 fotografias capturadas por meio de uma câmera modelo Canon PowerShot SX400 IS. Foram capturadas imagens das espigas utilizadas no processo de mensuração das características relatadas anteriormente. Foi realizado o processamento por meio da biblioteca OpenCV em linguagem Python, visando a contagem automatizada dos grãos de cada espiga. O processo envolveu binarização da imagem e detecção do seu respectivo contorno. Alternativamente, foi avaliada segmentação da imagem por meio de pacotes de visão computacional em linguagem Python e linguagem R, mas os resultados ficaram aquém do obtido por meio do processo de binarização.

Por fim, os dados foram associados com os valores reais da contagem de grãos de cada uma das espigas por meio de uma rede neural do tipo PMC, modelada por meio do pacote neuralnet em R. Foram consideradas diversas arquiteturas, mas a que proporcionou melhores resultados foi uma arquitetura de 4 camadas ocultas com 10, 15, 20 e 10 neurônios, nesta ordem, usando função de ativação tangente hiperbólica, e output não linear. Foram construídas mil redes, sendo estas selecionadas por meio do seu R^2 da população de teste (30%).

4.4. Análise Estatística dos Dados

Foi realizada análise de variância considerando modelo estatístico adequado para uma das características avaliadas. Todo o procedimento foi realizado por meio do software livre R (R CORE TEAM, 2024).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ANOVA

Na tabela 2 estão apresentados os resultados da análise de variância para as características avaliadas, considerando os fatores de tratamento foliar com Si, Ni e bioestimulante a base de nutrientes na atenuação de estresse térmico na cultura do milho.

Tabela 2 - Resumo da ANOVA para as características avaliadas: altura de inserção de espiga (He); comprimento de espiga (Ce); diâmetro de espiga (De) número de fileiras (Nf); grãos em três fileiras (G3f); massa de cem grãos (MCG) e produtividade (Pg), referentes a safra de milho 2024-2025. Os resultados de Quadrado Médio (QM) apresentados referem-se a ANOVA apenas com Tratamento Adicional Recovery 1 (T_{Ad.1}). O QM referente a Recovery 2 x Fatorial foi obtido a partir da análise individual considerando ANOVA apenas com esse tratamento adicional.

FV	QM						
	He	Ce	De	Nf	G3f	MCG	Pg
Silício	8,97	78,76***	0,20	4,83	3100,54***	45,89	1104324
Níquel	103,64	26,18***	1,09***	17,83***	4030,86***	17,88	200657
Bloco	120,56	3,85	0,06	1,96	350,16**	55,38	424211
Interação	57,63	31,29***	0,42***	4,30**	3170,23***	14,10	420109
T _{Ad.1} X fatorial	49,90	2,42	0,01	0,05	10,52	0,42	68668
T _{Ad.2} X fatorial	1,40	12,48	0,14	0,09	39,83	11,39	46924
Resíduo	49,84	3,08	0,08	2,17	211,56	22,81	1296821
Média	55,36	12,48	3,80	14,30	92,65	24,24	3164,24
Média T _{Ad.1}	59	12,22	3,79	14,3	93,18	23,90	3299,3
Média T _{Ad.2}	57,5	12,23	3,74	14,35	93,83	22,5	3052
CV(%)	12,7	14,09	7,5	10,3	15,69	19,72	35,9

* – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$.

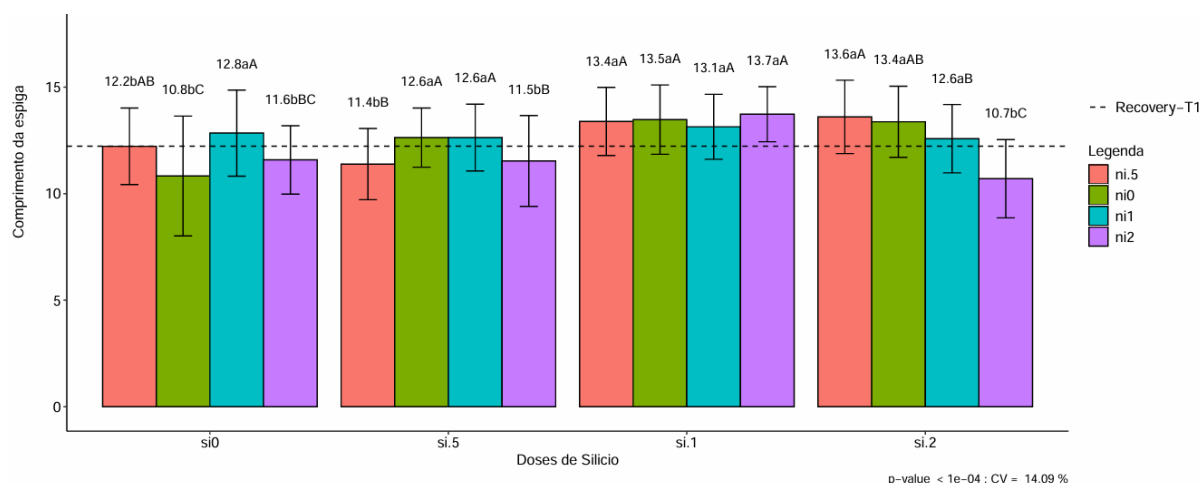
Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados da ANOVA evidenciaram efeitos significativos ($p < 0,001$) das variáveis Ce (comprimento de espiga) e G3f (grãos em três fileiras), tanto para o silício quanto para o níquel, assim como para a interação entre eles. Tal comportamento evidencia a ocorrência de efeitos sinérgicos entre os nutrientes na determinação de

algumas características, indicando que as mesmas são condicionadas pela combinação das diferentes doses dos elementos, como ilustrado nas Figuras 8 e 9. Nota-se que doses elevadas de Ni reduzem drasticamente o comprimento da espiga e o número de grãos em três fileiras, especialmente na ausência ou em doses baixas de silício (Si). Contudo, à medida que a disponibilidade de Si aumenta até doses intermediárias, tais efeitos tóxicos são atenuados o que resultou nas maiores médias observadas para essas características. Tal comportamento evidencia o papel do Si no equilíbrio nutricional e na redução de danos oxidativos, modulando a resposta das plantas ao excesso de Ni. Assim para tais características a aplicação conjunta dos elementos gera respostas mais eficientes do que o uso isolado de cada um, destacando o sinergismo entre nutrientes como estratégia para o manejo nutricional das culturas.

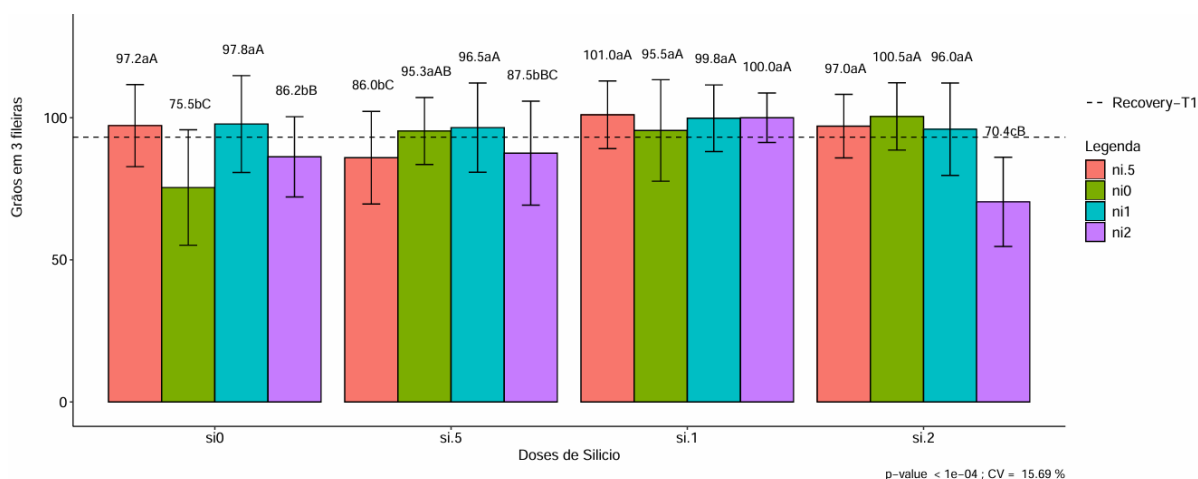
Estudos recentes têm demonstrado que o níquel (Ni), apesar de possuir uma estreita faixa ótima de aplicação, pode atuar como elemento benéfico para algumas gramíneas quando fornecido em doses baixas. Gomes (2023), ao avaliar a pulverização foliar de Ni em plantas de milho, verificou que doses baixas do elemento favorecem o aumento de pigmentos fotossintetizantes, elevam a atividade fotossintética e estimulam mecanismos de eficiência de assimilação de CO₂ com menor gasto de água. Tal efeito é particularmente importante em condições de estresse hídrico, pois auxilia na adoção de manejos em condições de seca. A autora, destaca ainda que a faixa adequada de aplicação é estreita; na dose 160 g ha⁻¹ o Ni se torna tóxico e reduz as mesmas variáveis que inicialmente favorece. De forma semelhante ao observado no presente experimento, mesmo com efeito significativo em algumas variáveis, não foram verificadas mudanças significativas na produtividade.

Figura 8. Estimativas de médias da característica comprimento da espiga. Médias seguidas pela mesma letra minúscula para o fator silício e maiúscula para o fator níquel não difere pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9. Estimativas de médias da característica Número de grãos em três fileiras. Médias seguidas pela mesma letra minúscula para o fator silício e maiúscula para o fator níquel não difere pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Dantas Junior *et al.* (2016), o comprimento das espigas de milho é diretamente influenciado pelo processo de fertilização dos óvulos, visto que o número de grãos por espiga refletirá no seu comprimento. Nesse estágio, evidencia-se a fragilidade da planta frente a estresses ambientais, que causam dessecação de

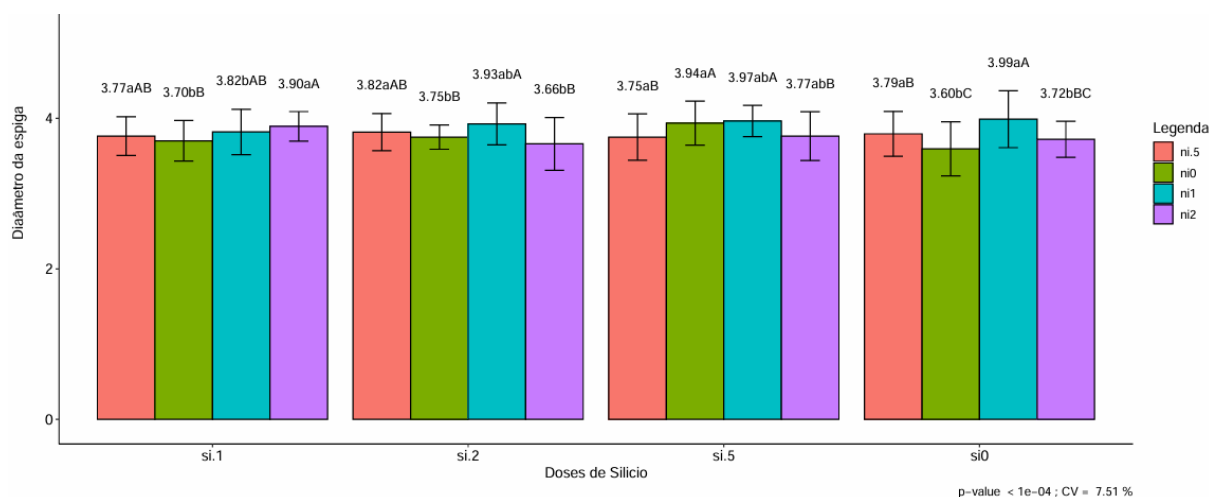
estruturas reprodutivas como estilos-estigmas, resultando em baixa polinização, menor número de grãos e consequentemente redução no comprimento das espigas. De acordo com Wang *et al.* (2020), o estresse térmico é capaz de afetar o desenvolvimento das espigas ainda nas fases iniciais de crescimento, reduzindo seu comprimento e diâmetro, além de aumentar a porção não diferenciada do ápice da espiga.

Durante o experimento, o clima foi marcado por dias quentes e irregularidade de chuvas com alternância de períodos secos e picos de chuva intensa. Essas condições afetam diretamente a absorção foliar de nutrientes e influenciam a resposta das plantas aos tratamentos. Temperaturas máximas elevadas como observado durante o período experimental diminuem a eficiência da pulverização foliar, isso por que além de outros fatores como momento da aplicação, e estágio fenológico da cultura o clima é determinante (Castro; Schjoerring, 2024). Dessa forma, a eficiência da aplicação tanto dos nutrientes como do bioestimulante pode ter sido afetada em dias mais quentes, contribuindo para a variação observadas entre tratamentos

O Si tem sido amplamente descrito como mitigador de estresses abióticos em plantas. Em plantas de milho submetidas ao estresse salino, o elemento foi capaz de melhorar características de crescimento e de defesa, regulando o metabolismo da planta, aumentando a produção de moléculas antioxidantes e compostos orgânicos (Ullah *et al.*, 2025)

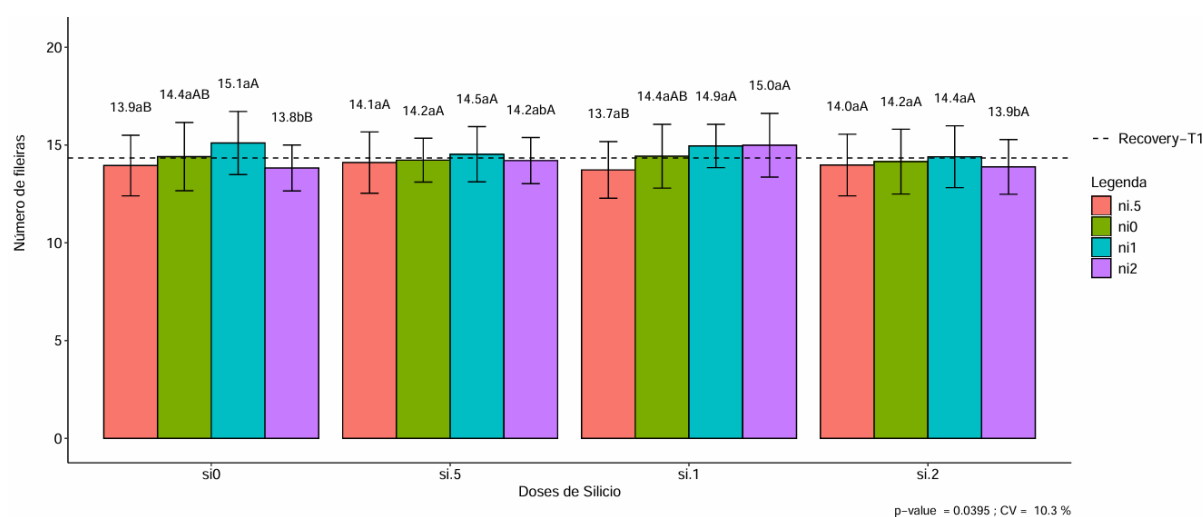
As variáveis De (diâmetro de espiga) e Nf (número de fileiras) apresentaram efeitos significativos ($p < 0,001$) apenas para o níquel, sendo que De também foi influenciada pela interação entre os nutrientes; A variável Nf apresentou significância ($p < 0,01$) para interação. As estimativas de médias para essas características estão apresentadas nas figuras 10 e 11, respectivamente.

Figura 10. Estimativas de médias da característica diâmetro de espiga. Médias seguidas pela mesma letra minúscula para o fator silício e maiúscula para o fator níquel não difere pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11. Estimativas de médias da característica Número de fileiras. Médias seguidas pela mesma letra minúscula para o fator silício e maiúscula para o fator níquel não difere pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em plantas de milho, o Ni contribuiu para funções vitais relacionadas à atividade de enzimas como a urease impactando a absorção de nitrogênio e na mitigação dos efeitos de estresses abióticos (Uğurlar *et al.*, 2024). O elemento não

atua de forma isolada, mas participa de mecanismos moleculares mais amplos em complexas interações nutricionais e homeostase iônica. Correia *et al.* (2024), ao avaliarem diferentes doses de Ni em variedades de soja, verificaram que o elemento modula as relações de absorção e translocação de nutrientes, reduzindo a concentração de alguns micronutrientes e favorecendo o acúmulo de macronutrientes. Zhang *et al.* (2023) demonstraram que o Ni reduz o acúmulo de metais-traço contaminantes em arroz, efeito atribuído a competitividade por sítio de adsorção.

Os resultados significativos obtidos para as características Nf e G3f ($p < 0,001$) estão de acordo com os achados de Kumar *et al.* (2018), que relataram melhora nos parâmetros de crescimento, nos componentes de rendimento e no estado nutricional de plantas de cevada tratadas com sulfato de níquel. Nesse estudo, atributos de produtividade, como o número de espigas por vaso, o número de grãos por espiga, a produção de grãos e o peso de 100 grãos, foram maximizados, especialmente na dose de 0,2% de sulfato de níquel. Ainda, foram observadas interações que alteraram as concentrações de outros nutrientes, como Zn, Fe e Mg, sugerindo a capacidade do níquel de influenciar a dinâmica e a homeostase entre os elementos com efeitos no rendimento das culturas.

No presente estudo, o período de enchimento de grãos ocorreu entre o final de dezembro e o início de janeiro, coincidindo com a fase em que o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) registrou temperaturas acima da média histórica na região Sudeste. De acordo com o INMET, o último trimestre de 2024 apresentou temperaturas superiores à média histórica, evidenciando uma tendência de aumento nos meses subsequentes, sendo setembro de 2024 registrado como o mais quente em 63 anos, com 1,7 °C acima da média histórica.

De acordo com Wang (2025), o crescimento do milho está diretamente condicionado a diversos fatores ambientais. As mudanças climáticas provocam variações na temperatura e no padrão de distribuição de chuvas. Essas alterações intensificam a ocorrência de estresses abióticos e bióticos que afetam negativamente a produtividade do milho. Segundo Landau *et al.* (2021), o máximo potencial genético e produtivo do milho é obtido a partir de níveis ótimos de fatores climáticos. O metabolismo C4 da espécie responde positivamente ao aumento da luminosidade, contudo, o aproveitamento da luz depende da arquitetura da planta, especialmente na distribuição e posicionamento das folhas. No entanto esses benefícios são limitados a uma faixa térmica ideal, entre 10°C e 30°C. Temperaturas acima desse intervalo,

inclusive durante a noite, reduzem o rendimento de grãos e antecipam a senescência das folhas, em razão do aumento da respiração, que intensifica o consumo dos metabólitos produzidos durante o dia. Além disso, temperaturas acima de 33°C durante a floração reduzem a germinação dos grãos de pólen e aceleram o ciclo fenológico da cultura, diminuindo o período destinado ao enchimento de grãos afetando a produtividade.

Wahyudi *et al.* (2024), observaram que a aplicação de Si promoveu alterações morfológicas capazes de melhorar a arquitetura das plantas e aumentar a interceptação de luz durante a fase vegetativa em cereais como milho e trigo. Além disso, o elemento equilibrou a relação dos macronutrientes, principalmente N e P.

Para as características He, MCG e Pg, não foram observados efeitos significativos entre os tratamentos.

Considerando as interações observadas, a definição das doses ideais de Si e Ni dependem da característica de interesse avaliada. Os tratamentos adicionais com bioestimulantes T_{Ad.1} e T_{Ad.2} apresentaram médias iguais a média geral do experimento, para todas as características avaliadas.

5.2 Avaliação com drone

O processo de aquisição de imagens com drone foi realizado, e a ortorretificação das imagens foi concluída com sucesso. A Figura 12 apresenta o ortomosaico final construído a partir de 175 imagens da safra 2024/2025. A ortorretificação é o processo de correção geométrica que elimina distorções, combinando a precisão de um mapa com o detalhamento de uma fotografia.

No entanto, o processo de fenotipagem de alto rendimento, que visa utilizar as redes neurais artificiais para associar os dados das imagens com o desempenho agrônomo e a produtividade da lavoura, não foi realizado uma vez que não foram detectados efeitos dos tratamentos para tal característica, portanto, não realizou-se a associação das imagens com as demais características.

Figura 12. Fotografia ortorretificada construído a partir de 175 imagens da safra 2024/2025, dos quais foram extraídas informações das parcelas experimentais, alocadas posteriormente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Visão computacional

Alternativamente, foi realizado processo de fenotipagem por imagem visando avaliar dados das espigas de milho. Para tanto, foram tomadas fotografias capturadas por meio de uma câmera modelo Canon PowerShot SX400 IS. Foram capturadas um total de 180 imagens. O processamento das imagens seguiu três etapas principais: preparo das imagens, segmentação e contagem automatizada de grãos. O processo de segmentação dos grãos foi realizado utilizando limiarização binária inversa (thresholding) com valor definido de 150. Nesse processo, cada pixel da imagem em escala de cinza passa a ter um valor de duas possibilidades, sendo este classificado em branco, pertencente ao grão, ou preto, pertencem ao fundo da imagem, sendo a imagem finalmente invertida. O resultado é uma imagem binária, onde os objetos de interesse neste caso os grãos estão destacados do fundo, permitindo que algoritmos específicos de contorno identifiquem cada grão de forma separada. Após a binarização os grãos foram detectados utilizando a função findContours. Em comparação com o processamento realizado no software R, a segmentação em Python demonstrou melhor acurácia na representação dos grãos o que pode ser comparado na Figura 13.

Figura 13. (A) Exemplo de segmentação de imagem, realizada por meio de rotina desenvolvida por meio do software R; (B) e rotina desenvolvida em Python, com o processo de binarização inversa da imagem. Os pontos vermelhos indicam grãos contados.

(A)



(B)

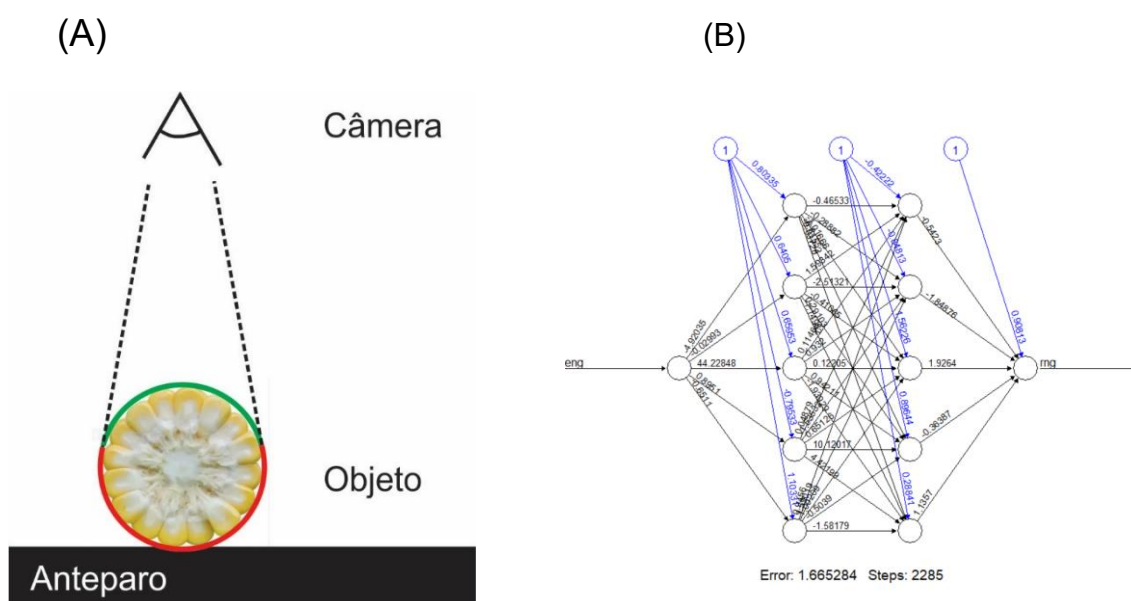


Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa abordagem permitiu realizar a contagem direta de grãos da espiga a partir da fração da imagem na qual os grãos são visíveis. Considerando que apenas cerca de 30% da espiga é visível em cada fotografia (Figura 14A), foi necessário modelar de uma rede neural artificial (Figura 14B) para estimar o número real de grãos. Na figura, está apresentado um exemplo de rede, cuja entrada constitui número de grãos estimados pelo algoritmo, e a saída, o número real de grãos contados manualmente.

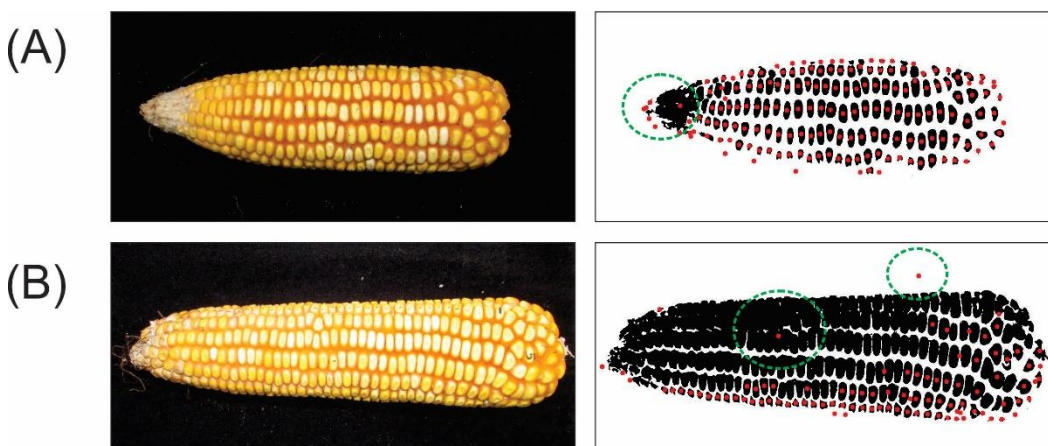
Considerando que a rotina para algoritmo de visão computacional não está perfeitamente otimizado e apresenta vários erros no processo de contagem (Figura 15)

Figura 14. (A) Esquema ilustrativo do sistema de aquisição das imagens empregada na fenotipagem por foto (verde – parte da espiga captada pela câmera; vermelha – parte oculta da espiga). (B) predição do número de grãos por meio de rede neural (exemplo de rede ilustrativa). A entrada constitui o número de grãos estimado pelo algoritmo da parte verde da espiga. A saída, constitui o número real de grãos, existente na parte verde + parte vermelha.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15. as imagens (A) e (B) apresentam imprecisões na contagem no número de grãos em algumas espigas. Os pontos vermelhos indicam grãos contados. Os círculos verdes ressaltam imprecisões encontradas no processo de contagem.

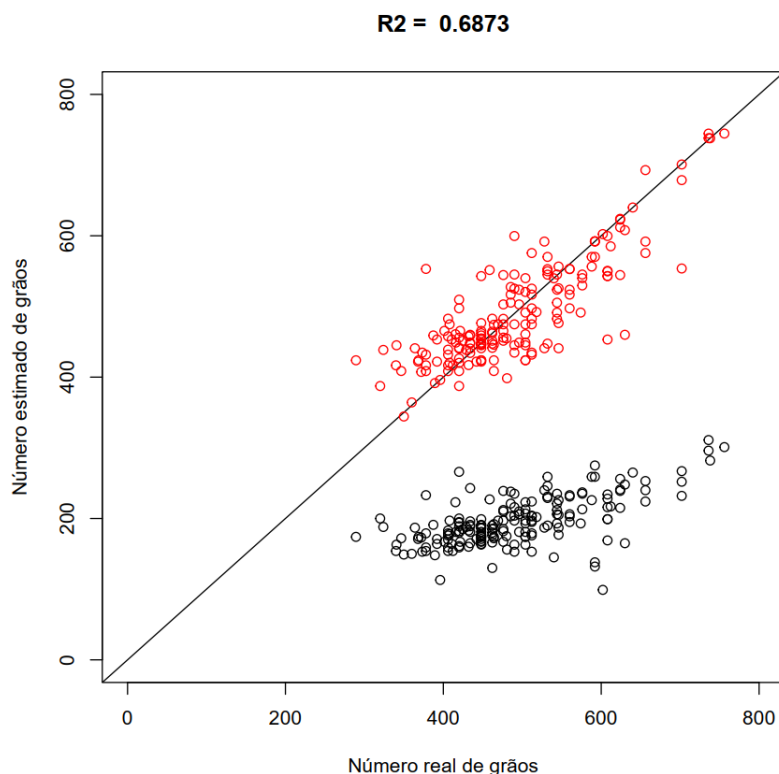


Fonte: Elaborado pelo autor.

A metodologia apresenta grande potencial de aplicação. Isso porque, os problemas não ocorreram em todas as espigas, tendo sido verificado em uma parcela das unidades experimentais (cerca de 30%). Acredita-se que o ocorrido seja resultado das diferenças de tonalidades dos grãos ou mesmo iluminação das fotografias. Enquanto o primeiro constitui um efeito não controlável, o segundo problema pode ser contornado por meio de uma melhor padronização no processo de aquisição das fotos.

Apesar dos problemas, o ajuste encontrado foi bastante satisfatório, com um coeficiente de determinação de 68,73% (Figura 16). Observa-se que pontos vermelhos no gráfico constituem a saída da rede neural e se aproximam de forma satisfatória da linha de ajuste perfeito (45°) traçada no gráfico, entre o número real e o número estimado de grãos.

Figura 16. Resultado da contagem de grãos por meio do processo de visão computacional. Os pontos pretos ao resultado da contagem de grãos da imagem, usados como informação de entrada na rede neural. Os pontos vermelhos correspondem ao resultado de saída da rede.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os próximos passos, além de melhorar a rotina desenvolvida, visamos implementar um processo de mensuração do diâmetro e do comprimento da espiga, visando facilitar ainda mais o processo de fenotipagem.

6 CONCLUSÃO

Para todas as características avaliadas, os tratamentos com micronutrientes $T_{Ad.1}$ e $T_{Ad.2}$ apresentaram média estatisticamente igual a média geral do experimento média geral do experimento.

O processo de fenotipagem de alto rendimento não pôde ser realizado devido à falta de significância para característica de produtividade.

O algoritmo de visão computacional aplicado às imagens das espigas apresentou resultado com potencial de utilização prática para mensuração de métricas das espigas.

REFERÊNCIAS

- ALVES, D. M. R.; DE OLIVEIRA, J. N.; DE MELLO, R.; FERREIRA, P. M. Silicon in the form of nanosilica mitigates P toxicity in scarlet eggplant. **Sci Rep.** v. 13, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36412-w>
- AMORIM, L.; BERGAMIN FILHO, A.; REZENDE, J. A. M. Manual de Fitopatologia. Agronômica Ceres. v. 15, 2018. ISBN 9788531800566.
- ARNON, D. I. Ferredoxin and Photosynthesis: An iron-containing protein is a key factor in energy transfer during photosynthesis. **Science.** v. 149. DOI. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.149.3691.1460>. Acesso em: 20 ago. 2025.
- ARNON, D. I.; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to Copper. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC437744/>. Acesso em: 07 ago. 2025.
- BAHUGUNA, R. N.; SOLIS, C. A.; SHI, W.; JAGADISH, K. S. V. Post-flowering night respiration and altered sink activity account for high night temperature-induced grain yield and quality loss in rice (*Oryza sativa* L.). **Physiologia Plantarum.** v. 159, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/ppl.12485>.
- BAKSHI, A.; PRAMANIK, S.; CARAGEA, D.; SOMAYANDA, I.; KUMAR, R.; BANGARI, M.; BEAN, S. R.; EMENDACK, Y.; HAYES, C. M.; JAGADISH, S. V. K. Sorghum-grain-count: A large image dataset and benchmark for sorghum grain count estimation. **Smart Agricultural Technology.** v. 12, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101218>.
- BARROS, G. S. C.; ALVES, L. R. A. Maior eficiência econômica e técnica depende do suporte das políticas públicas. **Visão Agrícola.** Piracicaba, n. 13, p. 4-7, 2015. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/edicoes/milho>. Acesso em: 19 jan. 2025.
- BERTOLIN, D. C.; SÁ, M. E.; ARF, O.; FURLANI, J. E.; COLOMBO, A. S.; CARVALHO, F. L. B. Aumento da produtividade de soja com a aplicação de bioestimulantes. **Bragantia**, v. 69, n. 2, 2010. DOI <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000200011>. Acesso em: 03 mar. 2025.
- BILLAH, M.; BERMAN, M.; HOLLIFIELD, M. K.; TSURUTA, S.; CHEN, C. Y.; PSOTA, E.; HOLL, J.; MISZTAL, I.; LOURENCO, D. Review: Genomic selection in the era of phenotyping based on digital images. **Animal.** v. 19, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.animal.2025.101486>.
- BRASIL. Diário Oficial da União. Lei nº 15.070, de 23 de dezembro de 2024. Dispõe sobre bioinsumos para uso agrícola, pecuário, aquícola e florestal; e altera as Leis nºs 14.785, 10.603 e 6.894. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-15.070-de-23-de-dezembro-de-2024-603825827>. Acesso em: 27 fev. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência e Inovação. Bioinsumos. Brasília: Ministério da Ciência e Inovação, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos/o-programa/conceitos>. Acesso em: 27 fev. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 6. ed. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee>. Acesso em: 17 fev. 2025.

BUONO, D. D. Can biostimulants be used to mitigate the effect of anthropogenic climate change on agriculture? It is time to respond. **Science of The Total Environment**, v. 751, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141763>. Acesso em: 08 abr. 2025

CASTRO, S. A. Q.; SCHJOERRING, J. K. Chapter Three – Foliar nitrogen and phosphorus fertilization. *Advances in Agronomy*, v. 187, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2024.05.002>.

CEPEA: Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Esaq – Usp). Sucroenergético 360°. Novembro, 2024. Disponível em: <https://www.cepea.org.br/br/sucoenergetico-360-1.aspx>. Acesso em: 08 abr. 2025

CHAGAS, R. S.; MURAOKA, T.; KORNDORFER, G. H.; CAMARGO, M. S. Silicon fertilizations improve yield and quality of rice and pearl millet in cerrado soils. **Biosci.J.** v. 32, 216. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/32792/18525>. Acesso em: 13 out. 2025.

CINTRA, P. H. N.; MELO, O. F. P.; MENEZES, J. O. S. Produção agrícola: uma revisão sobre as mudanças climáticas e produtividade de plantas graníferas no Brasil. **Agrotecnologia. Ipameri**, v. 11, n. 1, p. 87-94, 2020. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/agrotecnologia/article/view/9720>. Acesso em: 21 fev. 2025.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Quarto levantamento, janeiro 2025 – safra 2024/2025. : Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 20 jan. 2025

CONTINI, E.; MOTA, M. M.; MARRA, R.; BORGHI, E.; MIRANDA, R. A. de; SILVA, A. F. da; SILVA, D. D. da; MACHADO, J. R. de A.; COTA, L. V.; COSTA, R. V. da; MENDES, S. M. Milho: caracterização e desafios tecnológicos. *Desafios do Agronegócio Brasileiro*, 2. Brasília, DF: Embrapa; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, p. 8-9, 2019. Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=1106547&biblioteca=vazio&busca=1106547&qFacets=1106547&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>. Acesso em: 05 fev. 2025.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE. Copernicus Summer 2024 – Hottest on record globally and for Europe. **Copernicus Climate Change Service**, 2024. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/copernicus-summer-2024-hottest-record-globally-and-europe>. Acesso em: 10 out. 2025.

CORRÊA, D.; Produção de mudas de tomate com bioestimulante. **Agronomia Brasileira**, Jaboticabal, v. 4, 2020. DOI 10.29372/rab202006. Acesso em: 01 mar. 2025.

CORREIA, D. V. P.; RODAK, B. W.; MACHADO, H. A.; LOPES, G.; FREITAS, D. S. Beneficial or detrimental? How nickel application alters the ionome of soybean plants. **Plant Science**. v. 349, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2024.112274>.

COSTA, M. F.; VIDAL, R.; SILVA, N. C. A.; VEASEY, A. E.; FREIRAS, O. F.; ZUCCHI, I. M. Archaeological findings show the extent of primitive characteristics of maize in South America. **Science Advances**. v. 10, p. 1-9, 2024. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adn1466>. Acesso em: 14 dez. 2024.

COSTA, M. P. S.; SOUSA, M.C.; BRANDÃO, F. J. B.; ORMOND, A. T. S.; SILVA, M. A. P.; MATOS, V. A. T. Germinação e vigor na cultura do milho sob tratamento com bioestimulante para sementes. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, v. 7, n. 3, p. 1-11, 2024. DOI 10.34188/bjaerv7n3-046. Acesso em: 09 de abr. 2025.

DANTAS JUNIOR, E. E.; CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D. Lâminas de irrigação localizada e adubação potássica na produção de milho verde, em condições semiáridas. **Espacios**. v. 37, 2016. Disponível em: https://www.revistaespacios.com/a16v37n27/16372727.html?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 17 out. 2025.

DE CAMARGO, M. S.; BEZERRA, B. K. L.; HOLANDA, L. A.; VITTI, A. C.; SILVA, M. A. Silicon Fertilization Improves Physiological Responses in Sugarcane Cultivars Grown Under Water Deficit. **Journal of Science and Plant Nutrition**. v. 19, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>

DEBONA, D.; RODRIGUES, F. A.; DATNOFF, L. Silicon's Role in Abiotic and Biotic Plant Stresses. **Annual Review of Phytopathology**. v. 55, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035312>.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectivas. 2006. ISBN 85-99144-03-0.

FAO. The impact of disasters and crises on agriculture and food security: 2021. Ed: 1. Roma, IT: FAO, 2021. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/items/e5a5771a-6127-4e4a-ae1c-9f26fe8aa770>. Acesso em: 17 fev. 2025.

FILHO, I. A. P.; CRUZ, J. C.; GARCIA, J. C. Sistemas diferenciais de cultivo. Embrapa – Ageitec. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/sistemas-diferenciais-de-cultivo>. Acesso em: 04 fev. 2025.

FILHO, J. M. Potencial fisiológico determina qualidade de sementes. **Visão Agrícola**. Piracicaba, n. 5, p. 38-41, 2006. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/edicoes/soja>. Acesso em: 13 abr. 2025

FRITSCH NETO, R.; MORO, V.G. Escolha do cultivar é determinante e deve considerar toda informação disponível. **Visão Agrícola**. Piracicaba, n. 13, p. 12-15, 2015. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/edicoes/milho>. Acesso em: 19 dez. 2024.

GAJEWSKA, E.; SKTODOWSKA, M.; STABA, M.; MAZUR, J. Effect of nickel on antioxidative enzyme activities, proline and chlorophyll contents in wheat shoots. **Biologia Plantarum**. v. 50, 2006. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10535-006-0102-5>. Acesso em: 07 set. 2025.

GARCÍA-SÁNCHEZ, F.; SINAMÓN-GRAO, S.; NAVARRO-PÉREZ, V.; ALFOSEA-SIMÓN, M. Scientific Advances in Biostimulation Reported in the 5th BiostimulantWorldCongress. *Horticulturae*, v. 8, p. 665, 2022. DOI <https://www.mdpi.com/2311-7524/8/7/665>. Acesso em: 28 fev. 2025

GOMES, M. L. M. Interação níquel e nitrogênio em plantas de milho. 2023. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Chapadão do Sul, MS, 2023.

HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; ALAM, M. M.; FUJITA, M. Exogenous nitric oxide alleviates high temperature induced oxidative stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings by modulating the antioxidante defense and glyoxalase system. **Australian Journal of Crop Science**. 2012. DOI: <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.732190847330318>.

HOSSAIN, M. A.; BHATTACHARJEE, S.; ARMIN, S. M.; QIAN, P.; XIN, W.; LI, H.; BURRITT, D. J.; FUJITA, M.; TRAN, L. S. P. Hydrogen peroxide priming modulates abiotic oxidative stress tolerance: insights from ROS detoxification and scavenging. **Frontiers Media SA**. v. 6. p.420, 2016. Disponível em: https://scholar.google.com.br/citations?view_op=view_citation&hl=pt-BR&user=5yX3ks0AAAAJ&citation_for_view=5yX3ks0AAAAJ:p2q8aNsByqUC. Acesso em: 30 set. 2025

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Boletins Agroclimatológicos. Brasília: INMET. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/boletinsagro#>. Acesso em: 18 out. 2025.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Mudança do clima 2021: A base científica. Suíça. 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>. Acesso em: 08 fev. 2025.

KUMAR, O.; SINGH, S. K.; LATARE, A. M.; YADAV, S. N. Foliar fertilization of nickel affects growth, yield componente and micronutriente status of barley (*Hordeum vulgare* L.) grown on low nickel soil. **Archives of Agronomy and Soil Science**. 2018. DOI: 10.1080/03650340.2018.1438600.

LANDAU, E. C.; MAGALHÃES, P. C.; GUIMARÃES, D. P. Relações com o clima. Ageitec. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/relacoes-com-o-clima>. Acesso em: 18 out. 2025.

MAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006.

MINERVINI, M.; FISCHBACH, A.; SCHARR, H.; TSAFTARIS, S. A. Finely-grained annotated datasets for image-based plant phenotyping. **Pattern Recognition Letters**. v. 81, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2015.10.013>.

MUSTAFA, T.; SATTAR, A.; SHER, A.; UI-ALLAH, S.; LJAZ, M.; IRFAN, M.; BUTT, M.; CHEEMA, M. Exogenous application of silicon improves the performance of wheat under terminal heat stress by triggering physio-biochemical mechanisms. **Scientific Reports**. v. 11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02594-4>

NETO, D. D.; DARIO, G. J. A.; BARBIERI, A. P. P.; MARTIN, T. N. Ação de bioestimulante no desempenho agrônomo de milho e feijão. **Bioscience**, v. 30, 2014. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/issue/view/1106>. Acesso em: 05 mar. 2025.

PERKINS-KIRKPATRICK, S. E.; LEWIS, S. C. Increasing trends in regional heatwaves. **Nature Communications**. v. 11, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-16970-7>. Acesso em: 10 out. 2025.

PEROCHO, P. L.; CONCEPCION, R. Photogrammetry-based 3D root imaging and phenotyping: Platforms, technologies, algorithms, and future directions. **Smart Agricultural Technology**. v. 12, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101517>.

PES, L. Z.; ARENHARDT, M. H. Fisiologia vegetal. Santa Maria, RS : Universidade Federal de Santa Maria, 2015. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/840261981/Fisiologia-Vegetal>. Acesso em: 16 jul. 2025.

PORRAS, R. C. S.; GHOREISHI, G.; SÁNCHEZ, A.; BARRENA, R.; FONT, X.; BALLARDO, C.; ARTOLA, A. Solid-state fermentation of green waste for the production of biostimulants to enhance lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation under water stress: Closing the organic waste cycle. **Chemosphere**, v. 370, 2025. DOI <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143919>. Acesso em: 23 mar. 2025.

PRADO, E. V. Fenotipagem de plantas por meio de ferramentas digitais. **Gestão em foco**, 2023. Disponível em: <https://portal.unisepe.com.br/unifia/gestao-em-foco/ano-2023/>. Acesso em: 11 out. 2025.

PRASAD, P. V. V.; DJANAGUIRAMAN, M.; PERUMAL, R.; CIAMPITTI, I. A. Impact of high temperature stress on floret fertility and individual grain weight of grain sorghum: sensitive stages and thresholds for temperature and duration. **Plant Sci**. v. 6, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00820>.

RAHMAN, S.; AHMAD, I.; NAFEEES, M. Mitigation of heavy metal stress in maize (*Zea mays* L.) through application of silicon nanoparticles. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**. v. 50, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102757>.

RICHMOND, K. E.; SUSSMAN, M. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutriente. **Current Opinion in Plant Biology**. v. 6. p. 268 – 272, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00041-4). Acesso em: 03 out. 2025.

RIZWAN, A.; ZIA-UR-REHMAN, M.; RIZWAN, M.; USMAN, M.; ANAYATULLAH, S.; AREEJ.; ALHARBY, H. F.; BAMAGOOS, A. A.; ALHARBI, B. M.; ALI, S. Effects of silicon nanoparticles and conventional Si amendments on growth and nutrient accumulation by mayse (*Zea mays* L.) grown in saline-sodic soil. **Environmental Research**. v. 227, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115740>.

SANKARAN, S.; KHOT, L. R.; CARTER, A. H. Field-based crop phenotyping: Multispectral aerial imaging for evaluation of winter wheat emergence and spring stand. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 118, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.001>.

SANTOS, E. S.; AZEVEDO, A. M.; RABELO, N. G.; ANASTÁCIO, V. Z.; RODRIGUES, E. B.; AMORIM, P. S.; SILVA, J. R.; GOMES, L. S. P.; MONTEIRO, A. L. M. High-yield phenotyping in evaluating the productivity of a diallel with tomato plant. **Scientia Horticulturae**. v. 342, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114044>.

SANTOS, L. C.; MENDES, G.; ABRANCHES, M.; ROCHA, J. L. A.; SILVA, S. T. A.; RIBEIRO, M. D. S.; GOMES, V. R.; SEVERO, P. J. S.; BRILHANTE, C. L.; SOUSA, F. Q. The role of silicon in plants. **Research, Society and Development**. v. 10, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16247>. Acesso em: 30 set. 2025.

SHARMA, C. P. **Plant Micronutrients**. Boca Raton, FL, 2006. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781482280425/plant-micronutrients-sharma>. Acesso em: 04 ago. 2025.

SHI, Y.; ZHANG, Y.; HAN, W. H.; FENG, R.; HU, Y.; GUO, J.; GONG, H. Silicon Enhances Water Stress Tolerance by Improving Root Hydraulic Conductance in *Solanum lycopersicum* L. **Front Plant Sci**, 2016. DOI: 103389/fpls.2016.00196.

SOUSA, C. A. F. Fenotipagem de planta: uma nova abordagem para um velho problema. Comunicado técnico 06. Brasília - <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/991030?locale=es>.

SOUZA, G. M.; BARBOSA, A. L. Fatores de estresse no milho são diversos e exigem monitoramento constante. **Visão Agrícola**. Piracicaba, n. 13, p. 30-34, 2015. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/edicoes/milho>. Acesso em: 20 jan. 2025.

STONEX. INTELIGÊNCIA DE MERCADO. Brasil produz milho em três safras por ano. 2022. Disponível em: <https://mercadosagricolas.com.br/inteligencia/brasil-produz-milho-em-tres-safras-por-ano/>. Acesso em: 04 fev. 2025.

STRAZZI, S. Derivados do milho são usados em mais de 150 diferentes produtos industriais. **Visão Agrícola**. Piracicaba, n. 13, p. 146-150, 2015. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/edicoes/milho>. Acesso em: 14 dez. 2024.

SUN, Q.; ZHAO, Y.; ZHANG, Y.; CHEN, S.; YING, Q.; LV, Z.; CHE, X.; WANG, D. Heat stress may cause a significant reduction of rice yield in China under future climate scenarios. *Science of The Total Environment*. v. 818, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151746>.

ULLAH, M. S.; MAHMOOD, A.; ALAWADI, H. F. N.; SELEIMAN, M. F.; KHAN, B. A.; JAVAID, M. M.; WAHID, A.; ABDULLAH, F.; WASONGA, D. O. Silicon-mediated modulation of maize growth, metabolic responses, and antioxidant mechanisms under saline conditions. *Plant Biol*, 2025. DOI: 10.1186/s12870-024-06013-4.

UĞURLAR, F. Influence of Nickel on Urease Activity and Nitrogen Dynamics in Maize (*Zea mays*) Under Saline Conditions. (2024). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14306271>

UNDERHILL, A. N.; HIRSCH, C. D.; CLARK, M. D. Evaluating and Mapping Grape Color Using Image-Based Phenotyping. **Plant Phenomics**. v. 2020, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34133/2020/8086309>.

UNIVERSITY OF NOTTINGHAM. Plant phenotyping. Disponível em: <https://www.nottingham.ac.uk/research/groups/cvl/projects/plant-phenotyping/plant-phenotyping.aspx>. Acesso em: 11 out. 2025.

VARA PRASAD, P. V.; BHEEMANAHALLI, R.; KRISHNA, S. V. Field crops and the fear of heat stress-Opportunities, challenges and future directions. **Field Crops Research**. v. 200, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.09.024>.

WAHYUDI, M. I.; SURYANTO, A.; SUGITO, Y.; SUGIHARTO, A. N.; HAMID, A. Impact of Integrated Nutrient Management Based of Silicon to Morpho-Physiological Changes on Maize: Enhancing Light Interception and Radiation use Efficiency. **J. Glob. Innov, Agric, Sci**. 2024. DOI: <https://doi.org/10.22194/JGIAS/24.1346>.

WANG, H.; LIU, P.; ZHANG, J.; ZHAO, B.; REN, B. Endogenous Hormones Inhibit Differentiation of Young Ears in Maize (*Zea mays* L.) Under Heat Stress. **Plant Sci**. v. 11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.533046>.

WANG, K. Insights into Environmental Factors Affecting Maize Growth. **Maize Genomics and Genetics**. v. 16, 2025. DOI: 10.5376/mgg.2025.16.0016.

WANG, Q.; LU, J.; WANG, Y.; PENG, K.; GAO, Z. Phenotyping of navel orange based on hyperspectral imaging technology. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 237, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110642>.

WATERMAN, J. M.; CIBILS-STEWART, X.; CAZZONELI, C. I.; HARTLEY, S. E.; JOHNSON, S. N. Short-term exposure to silicon rapidly enhances plant resistance to herbivory. **Ecology: Ecological society of America**. 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1002/ecy.3438>

WHITE, J. G.; ZASOSKI, R. J. Mapping soil micronutrientes. **Field Crops Research**, v. 60, p. 11-26, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00130-0](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00130-0). Acesso em: 03 ago. 2025.

XIAO, T.; YANG, L.; HE, X.; WANG, L.; ZHANG, D.; CUI, T.; ZHANG, K.; LI, H.; LI, Z.; DONG, J. Assessing the ecotoxicological risk of nicosulfuron on maize using multi-source phenotype data and hyperspectral imaging. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. v. 295, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118176>.

YANG, H.; GU, X.; DING, M. LU, W.; LU, D. Heat stress during grain filling affects activities of enzymes involved in grain protein and starch synthesis in waxy maize. **Scientific Reports**. v. 8, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33644-z>.

YU, Y.; WANG, C.; FU, Q.; KOU, R.; HUANG, F.; YANG, B.; YANG, T.; GAO, M. Techniques and Challenges of Image Segmentation: A Review. **Electronics**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12051199>.

ZHANG, Z.; LU, Y.; LI, H.; GAO, Y.; YANG, Z. The role of nickel in cádmium accumulation in rice. **Science of The Total Environment**. v. 859, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160421>.

ZHENG, H.; TANG, W.; YANG, T.; ZHOU, M.; GUO, C.; CHENG, T.; CAO, W.; ZHU, Y.; ZHANG, Y.; YAO, X. Grain Protein Content Phenotyping in Rice via Hyperspectral Imaging Technology and a Genome-Wide Association Study. **Plant Phenomics**. v. 6, 2024. DOI: <https://doi.org/10.34133/plantphenomics.0200>.

ZONTA, E., BRASIL, F. C., GOI, S.R., ROSA, M. M. T. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo. Viçosa: 2006. Cap. 2, p. 8.