



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE  
QUEIROZ”  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DO SOLO**

**Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Agrônoma**

**PODE A SUPLEMENTAÇÃO ESTIMULANTE DE FÓSFORO VIA FOLIAR  
MELHORAR O METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO, ANTIOXIDANTE E  
PRODUTIVO DO MILHO?**

Aluno: Mateus Biazoti Ferrari

Orientador: Paulo Sérgio Pavinato

E-mail: pavinato@usp.br

**Piracicaba**

**2022**

**MATEUS BIAZOTI FERRARI**

**PODE A SUPLEMENTAÇÃO ESTIMULANTE DE FÓSFORO VIA FOLIAR  
MELHORAR O METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO, ANTIOXIDANTE E  
PRODUTIVO DO MILHO?**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de: Engenheiro Agrônomo na  
Universidade de São Paulo, Escola Superior de  
Agricultura “Luiz de Queiroz”

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Pavinato

**PIRACICABA**

**2022**

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 Importância econômica da cultura do Milho.....	8
2.2 Fósforo no solo.....	9
2.3 O papel do fósforo na planta .....	9
2.4 Adubação foliar com fósforo.....	10
3. OBJETIVOS .....	11
3.1 Objetivo geral.....	11
3.2 Objetivos específicos.....	12
4 MATERIAL E MÉTODOS .....	12
4.1 Localização da área e delineamento experimental .....	12
4.2 Avaliações .....	14
4.2.1 Estado nutricional das plantas .....	14
4.2.3 Pigmentos fotossintéticos.....	14
4.2.4 Trocas gasosas.....	15
4.2.5 Atividade enzimática fotossintética.....	15
4.2.6 Carboidratos nas folhas .....	15
4.2.7 Estresse oxidativo e enzimas antioxidantes.....	16
4.2.8 Biometria e Produtividade.....	16
4.3 Análise estatística.....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	17
5. CONCLUSÕES.....	25
REFERÊNCIAS .....	26
ANEXOS.....	32

## RESUMO

A adubação fosfatada nos solos brasileiros apresenta baixa eficiência devido à presença de sesquióxidos de Fe e Al que fixam até 80% do P aplicado no solo, indisponibilizando-o para as plantas. Neste sentido, a aplicação foliar de P pode ser vantajosa, tendo em vista o fornecimento direcionado aos órgãos de maior consumo e em estágios fenológicos estratégicos de maior absorção. Portanto, objetivou-se com este estudo, avaliar a influência das épocas de aplicação de fósforo via foliar sobre o metabolismo fotossintético, antioxidante e a produtividade de milho safrinha. O experimento foi conduzido no município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP. Os tratamentos foram constituídos pela aplicação de MAP em diferentes estágios: Controle (sem aplicação); V<sub>4</sub>, V<sub>6</sub>, V<sub>8</sub>, R<sub>1</sub> e TA (V<sub>4</sub>+ V<sub>6</sub>+V<sub>8</sub>+R<sub>1</sub>). Foram avaliados o status nutricional das plantas de milho, concentração de pigmentos fotossintéticos (Clorofilas *a* e *b* e carotenóides), parâmetros de trocas gasosas, atividade da enzima Rubisco, concentração de carboidratos, concentração de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), Malondialdeído (MDA), superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase e teor de prolina. Também foram avaliados os componentes de produção e produtividade de grãos. Os dados foram submetidos à análise de variância e em seguida ao teste LSD ( $p < 0,05$ ). Os pigmentos fotossintéticos, os parâmetros de trocas gasosas, a atividade da Rubisco, teor de açúcares redutores e atividade antioxidante foram melhorados com as aplicações de MAP em estágios mais tardios, e, principalmente sob o tratamento TA, culminando em maior produtividade de grãos. Conclui-se que a aplicação foliar de MAP foi eficiente em melhorar o metabolismo do carbono e o metabolismo antioxidante de plantas de milho, levando a incrementos na produtividade de grãos.

**Palavras chave:** adubação foliar, nutrição mineral, épocas de aplicação, adubação fosfatada, milho (*Zea Mays* L.)

## ABSTRACT

Phosphate fertilization in Brazilian soils has low efficiency due to the presence of Fe and Al sesquioxides that fix up to 80% of the P applied in the soil, making it unavailable for the plants. In this sense, the foliar application of P can be advantageous in view of the supply directed to the organs of greater consumption and in strategic phenological stages of greater absorption. Therefore, the objective of this study was to evaluate the influence of the times of application of phosphorus via foliar on photosynthetic and antioxidant metabolism and productivity of off-season corn. The experiment was conducted in the municipality of Santa Cruz do Rio Pardo - SP. The treatments consisted of the application of P in different stages: Control (no application); V<sub>4</sub>, V<sub>6</sub>, V<sub>8</sub>, R<sub>1</sub> and TA (V<sub>4</sub>+V<sub>6</sub>+V<sub>8</sub>+R<sub>1</sub>). The nutritional status of corn plants, concentration of photosynthetic pigments (Chlorophylls *a*, *b* and carotenoids), gas exchange parameters, Rubisco enzyme activity, carbohydrate concentration, concentration of hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), Malondialdehyde (MDA), superoxide dismutase were evaluated. (SOD), catalase (CAT), ascorbate peroxidase and proline content. The components of production and grain yield were also evaluated. Data were submitted to analysis of variance and then to the LSD test ( $p < 0.05$ ). The results showed that photosynthetic pigments, gas exchange parameters, Rubisco activity, reducing sugars and antioxidant activity were improved with P applications at later stages, and especially under the TA treatment, culminating in higher productivity. of grain. It was concluded that foliar application of P was efficient in improving carbon metabolism and antioxidant metabolism of maize plants, leading to increases in grain yield.

**Keywords:** foliar fertilization, mineral nutrition, application times, phosphate fertilization, Maize (*Zea Mays* L.)

## 1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é um dos cereais mais importantes em muitos países, devido ao seu alto valor nutritivo e seu papel como matéria-prima para diversos produtos industriais, podendo ser usado em indústria de rações, alimentos e produção de etanol (RATHNA PRIYA; MANICKAVASAGAN, 2021). Com o aumento da demanda global, e pelo seu alto valor comercial, novas tecnologias têm surgido visando aumentar o rendimento deste cereal. Dentre as tecnologias emergentes, os fertilizantes especiais para aplicações foliares têm ganhado destaque devido aos seus importantes resultados na melhoria do metabolismo fotossintético e antiestresse das plantas cultivadas (RODRIGUES et al., 2021a)

Um dos elementos mais importantes para o pleno funcionamento energético e fisiológico das plantas é o fósforo (P) (HALSTED; LYNCH, 1996), o qual a utilização de estratégias alternativas de suplementação do P não tem sido dada a devida atenção. O P é um elemento essencial para o desenvolvimento das plantas, com papel fundamental nos processos fotossintéticos, funções metabólicas celulares, metabolismo energético, síntese e composição de ácidos nucleicos (MARDAMOOTOO; DU PREEZ; BARNARD, 2021; TAIZ et al., 2017), transferência de energia e translocação de nutrientes dentro da planta (MARSCHNER, 2011).

De modo geral, solos tropicais e subtropicais apresentam baixo teor de P disponível (BIELESKI, 1973), tornando-se muitas vezes um dos nutrientes que mais limitam a produção das culturas em todo o mundo (SOLTANGHEISI et al., 2019). Com o intuito de sanar as necessidades das plantas e fornecer quantidades necessárias para o seu desenvolvimento normal, quantidades relativamente altas de fertilizantes fosfatados minerais são adicionados nos sistemas de cultivo (WITHERS et al., 2018). No entanto, devido à alta reatividade deste elemento, e também pela mineralogia dos solos, a retenção de P nos constituintes dos solos é favorecida (SYERS; JOHNSTON; CURTIN, 2008). Com a formação de compostos pouco solúveis, a eficiência da fertilização torna-se muito baixa (BARBER, 1995). Dessa forma, é importante buscar alternativas que visam aumentar o aproveitamento do P pelas plantas, uma vez que este nutriente é finito e insubstituível, e o manejo adequado de fertilizantes fosfatados se torna indispensável.

Baseado nestas premissas, a aplicação foliar de P pode ser uma ferramenta viável de suplementar este nutriente para as plantas, aumentando a eficiência de seu uso (EDDY 2000). Estas aplicações podem melhorar o aproveitamento de P pelas plantas, além de

reduzir perdas por meio do escoamento superficial causado pelas chuvas, que é responsável pela eutrofização de muitos córregos e rios, utilizando-o de forma sustentável (SHARPLEY et al., 1994). A adubação foliar estimulante não visa substituir 100% o fornecimento de nutrientes via solo, mas sim, servir como estímulo para o metabolismo foliar das plantas devido ao fornecimento do P diretamente no centro das reações fotossintéticas (folha). O conceito de adubação foliar estimulante já foi elencado na literatura (PRIMAVESI, 1978), indicando a possibilidade de seu uso quando não há limitação nutricional via solo (ROSOLEM, 2002). Neste caso, este tipo de aplicação foliar pode aumentar ainda mais a produtividade das culturas. No entanto, o manejo da planta, e fatores ambientais podem influenciar a eficiência da aplicação foliar de P, assim como o estágio de desenvolvimento da cultura (GIRMA et al., 2007). Desta forma, adequar o fornecimento do P foliar para a produção de milho e determinar o momento ideal de aplicação, é imprescindível para que se obtenha sucesso em sua utilização.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Importância econômica da cultura do Milho**

O milho (*Zea mays* L.), juntamente com o trigo e o arroz constituem os principais cereais básicos consumidos no mundo. Desde a colonização das américas pela Europa, o milho foi rapidamente disseminado pelo mundo, e hoje, se tornou o principal cereal básico global, com uma produção anual superior a 1 bilhão de toneladas (GARCÍA-LARA; SERNA-SALDIVAR, 2019). O milho desempenha um papel diversificado e dinâmico nos sistemas agroalimentares globais e na segurança alimentar/nutricional (ERENSTEIN et al., 2022; GROTE et al., 2021; POOLE; DONOVAN; ERENSTEIN, 2021). Em algumas regiões da Ásia, América Latina e África subsaariana, o milho corresponde mais de 20% das calorias consumidas na população, sendo assim um alimento básico fundamental de várias civilizações do mundo (SHIFERAW et al., 2011). O milho é um alimento versátil, e tem sido empregado também na alimentação animal, que impulsionada pelo aumento do consumo de carne, tem ganhado mais expressividade nas lavouras em todo o globo (ERENSTEIN, 2010).

O Brasil é um dos principais produtores de milho do mundo, ficando atrás apenas dos EUA e China, com uma produção estimada em 126.941,5 mil toneladas em 2022 em uma área planta de aproximadamente 22.407,2 mil ha (CONAB, 2022; FAOSTAT, 2020).

A alta produtividade alcançada nas lavouras brasileiras de milho se deve à combinação de novas genéticas de milho altamente produtivas com manejo intensivo das culturas (ERENSTEIN et al., 2022). O desenvolvimento de práticas de manejo dos solos do cerrado, como a calagem e a gessagem, permitiram o aumento da eficiência das adubações, bem como o aumento produtivo das culturas (CHADDAD, 2016). No entanto, em sistemas agrícolas altamente produtivos, técnicas auxiliares devem ser preconizadas a fim de otimizar a utilização dos recursos de modo sustentável.

## **2.2 Fósforo no solo**

O fósforo (P) nos solos ocorre quase exclusivamente na forma de ortofosfato com concentrações totais de P geralmente na faixa de 500-800 mg kg<sup>-1</sup> (MENGEL et al., 2001). Nos solos brasileiros, originalmente há uma baixa disponibilidade de P para o cultivo devido à alta capacidade de retenção do P em fase sólida, devido à constituição predominante de sesquióxidos de Fe e Al, capaz de reter íons fosfatos em formas menos lábeis (FINK et al., 2014, 2016; KURIHARA et al., 2016). Esta condição torna obrigatória a aplicação de fertilizantes fosfatados, inicialmente para aumentar a disponibilidade de P a níveis aceitáveis antes do cultivo, posteriormente, para manter os níveis disponíveis durante as safras subsequentes, repondo o P exportado pelas colheitas (KURIHARA et al., 2016).

A existência destes sumidouros (P fixado na fase mineral) torna as aplicações de P nos solos pouco eficientes, pois um alto aporte de fertilizantes fosfatados são requeridos, a uma taxa superior à exportada pelas colheitas, ao estabelecer o sistema de cultivo sob solos com baixo teor inicial de P (NUNES et al., 2020). Por esta razão, atualizações nas técnicas de manejo são frequentemente estudadas a fim de garantir maior aproveitamento do P fornecido às plantas.

## **2.3 O papel do fósforo na planta**

O P é um heteroelemento necessário para a formação de compostos como ATP, NADPH, ácidos nucleicos, fosfatos de açúcar e fosfolipídios, todos os quais desempenham papéis importantes na fotossíntese (HAMMOND; WHITE, 2008). O fósforo é necessário para a reação de luz da fotossíntese, na qual a luz absorvida conduz a cadeia de transporte de elétrons na membrana do tilacóide para gerar ATP e NADPH. O fósforo também é necessário para as reações bioquímicas da fotossíntese (ciclo de Calvin-Benson), que usam ATP e NADPH para converter CO<sub>2</sub> em carboidratos no estroma do cloroplasto. Níveis



reduzidos de ortofosfato ( $P_i$ ) no cloroplasto causam uma diminuição na produção de ATP, porque  $P_i$ , juntamente com  $CO_2$  e  $H_2O$ , são os substratos primários para a fotossíntese. Além disso, durante a deficiência de P, uma maior proporção de  $NADP^+$  permanece na forma reduzida (NADPH), pois não pode ser utilizada no ciclo de Calvin-Benson devido à limitação de ATP (CARSTENSEN et al., 2018). A falta de P afeta o balanço entre a síntese e o catabolismo do metabolismo do carbono. Níveis baixos de  $P_i$  fazem com que o fluxo de carbono se desloque para o acúmulo de amido, reduzindo a assimilação de  $CO_2$  (HELDT et al., 1977). Como resultado, uma redução significativa na produção de biomassa é observada (DE BANG et al., 2021).

A deficiência de fósforo também eleva o estresse oxidativo celular, diminuindo não somente a produção de carboidratos, mas também provocando danos aos componentes celulares. Plantas deficientes em  $P_i$  podem apresentar fotoinibição, pois os cloroplastos não são capazes de processar toda a energia luminosa que chega aos tilacóides (FURBANK; FOYER; WALKER, 1987). Com isso, há o acúmulo de energia, uma vez que o fluxo de elétrons na cadeia transportadora de elétrons é prejudicado e a produção de ATP é paralisada. Para isso, a planta desenvolveu uma série de mecanismos para neutralizar o estresse foto-oxidativo, como a formação e eliminação de espécies reativas de oxigênio (EROs), como o  $H_2O_2$ . Estas EROs são responsáveis por dissipar o excesso de elétrons nos cloroplastos, mas por serem altamente reativas, podem levar a oxidação dos componentes celulares importantes, como membranas celulares, lipídeos e até mesmo DNA (HERNÁNDEZ; MUNNÉ-BOSCH, 2015). Portanto, o fornecimento oportuno de P às plantas deve ser preconizado ao longo de todo o ciclo da planta, a fim de diminuir o estresse oxidativo e maximizando a eficiência fotossintética.

## **2.4 Adubação foliar com fósforo**

A adubação foliar é uma importante ferramenta para o manejo de culturas de modo sustentável e produtiva, e tem importância comercial significativa em todo o mundo. Os fertilizantes foliares são usados por três razões: (1) quando as condições do solo limitam a disponibilidade de nutrientes aplicados no solo; (2) quando são possíveis altas taxas de perda de nutrientes aplicados no solo; e (3) quando o estágio de crescimento da planta, a demanda interna da planta e as condições ambientais interagem para limitar o fornecimento de nutrientes aos órgãos críticos da planta (FERNÁNDEZ; BROWN, 2013).

Em virtude da alta taxa de fixação de P nos solos, a suplementação de P via foliar em momentos críticos pode aumentar a eficiência do uso de fertilizantes fosfatados, principalmente em solos problemáticos (WITHERS et al., 2014). A principal vantagem da aplicação foliar é o seu alto aproveitamento, sendo que mais de 80% do P aplicado via foliar pode ser absorvido pelas folhas (THORNE, 1957), enquanto a eficiência de aplicação via solo é de aproximadamente 20% (RAGHOTHAMA, 1999). De fato, vários estudos avaliando essa prática de manejo em condições de campo mostraram que a fertilização foliar com P tem um efeito positivo na produtividade das culturas de grãos (GIRMA et al., 2010; GÖRLACH; MÜHLING, 2021; MOSALI et al., 2006; REZENDE et al., 2005; WITHERS et al., 2014; ZAMBROSI, 2019).

Salienta-se que o principal objetivo da adubação foliar não é a de substituir a aplicação via solo, que envolve a assimilação de nutrientes pelas raízes, já que as quantidades de nutrientes exigidos pelas culturas são muito superiores às quantidades de nutrientes que poderiam ser absorvidas pelas folhas (NACHTIGAAL; NAVA, 2010; ZAMBROSI, 2019). Um conceito da adubação foliar que tem sido explorado recentemente, é adubação foliar suplementar ou estimulante, onde, pequenas doses de nutrientes são aplicadas em estágios fenológicos estratégicos com o objetivo de estimular o metabolismo do carbono, ainda que estas plantas já se encontrem bem nutridas (FAGERIA et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2022; RODRIGUES et al., 2021a, 2021b; ROSOLEM, 2002). Em estudos recentes, plantas de milho fertilizadas com macro e micronutrientes apresentaram melhora na atividade fotossintética, no metabolismo do carbono e antioxidante, culminando em maiores produtividades (OLIVEIRA et al., 2022; RODRIGUES et al., 2021a, 2021b). Para o fósforo, poucos trabalhos se dedicaram a estudar os efeitos de sua aplicação via foliar na cultura do milho, com foco no metabolismo fotossintético e antioxidante em condições de campo. Ademais, o posicionamento da época de aplicação é fator crucial para a efetividade desta prática. Sendo assim, ressalta-se a necessidade de novos experimentos que busquem caracterizar o efeito do P foliar na cultura do milho de segunda safra.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

Objetivou-se com este estudo identificar as melhores épocas de aplicação de P via foliar na cultura do milho, visando estímulo para a melhoria nas trocas gasosas, metabolismo do carbono e antioxidante, status nutricional e produtividade da cultura do milho segunda safra.

### 3.2 Objetivos específicos

- Identificar quais épocas de aplicação de P via foliar promovem melhoria da fisiologia e produtividade do milho;
- Analisar como a aplicação foliar de P afeta o metabolismo fotossintético e antioxidante das plantas de milho;
- Verificar a eficiência da adubação foliar com P sobre a produtividade de milho de segunda safra;

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Localização da área e delineamento experimental

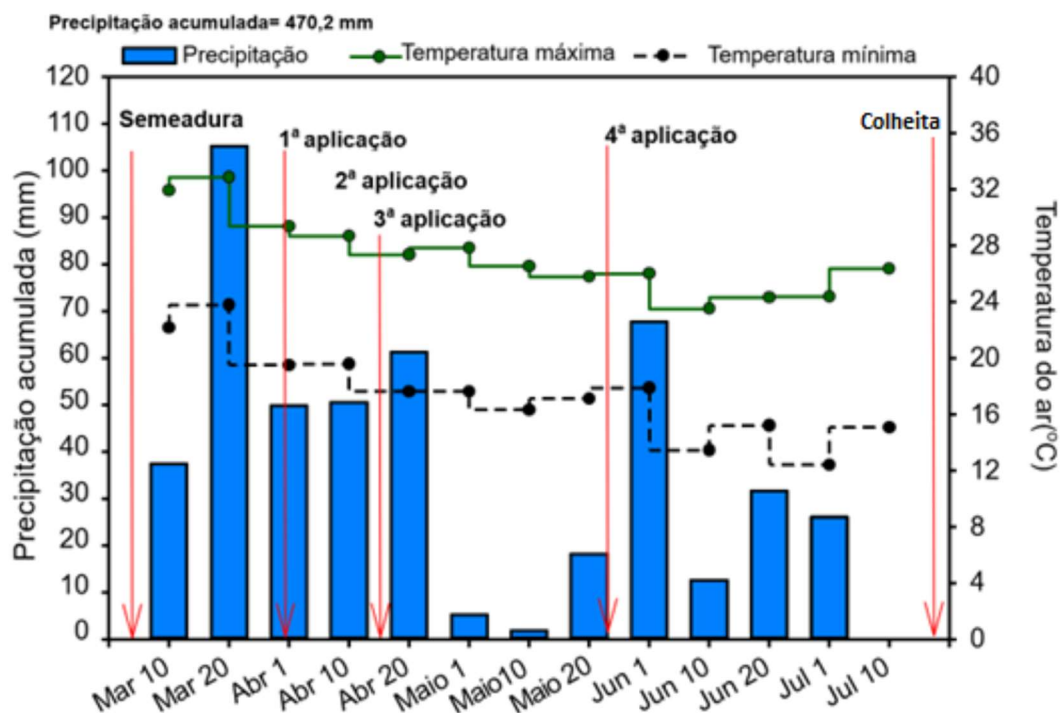
O experimento foi conduzido em área experimental localizada no Município de Santa Cruz do Rio Pardo (latitude 22° 87' 13" Sul, longitude 49° 60' 02" Oeste), altitude 467 m. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (DOS SANTOS et al., 2018), o solo da área experimental é denominado como LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico de textura argilosa (0-20 cm; argila = 600 g kg<sup>-1</sup>). O clima predominante da região é o Cwa, zona subtropical húmica, com invernos secos e verão quente, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, com temperatura média anual de 21,5 °C e a média pluvial próxima de 1.312 mm. Em período antecedente à semeadura, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-20 cm de profundidade para determinação das propriedades químicas e granulométricas do solo (Tabela 1).

**Tabela 1** – Caracterização química do solo antes da implantação do experimento. Santa Cruz do Rio Pardo -SP, 2020.

Prof.	pH	M.O.	P <sub>resina</sub>	S	Al <sup>3+</sup>	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%
cm	CaCl <sub>2</sub>	g dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>		-----	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	-----		mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>		%
						---					
0-20	5,35	30,5	18,3	45,1	0,55	2,64	44,3	25,0	71,9	110,9	63,3

\*Metodologia (VAN RAIJ et al., 2001)

As condições climáticas da região durante o período de condução do experimento são apresentadas na figura 1.



**Figura 1.** Condições climáticas durante o período de condução do experimento em médias decendiais. Santa Cruz do Rio Pardo/SP, 2022.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso (DBC), composto por 6 tratamentos e 4 repetições, como descrito na Tabela 2. Cada unidade experimental possuía 21 m<sup>2</sup> (3 m de largura × 7 m de comprimento), com espaçamento de 0,45 m entre linha.

A sementeira foi realizada no dia 4 de março de 2022. O híbrido utilizado foi o P3858PWU com uma densidade de sementeira de 3 sementes m<sup>-1</sup>. A adubação de base, aplicado no sulco de sementeira foi realizada com 500 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 04-14-8 (N, P, K), o que representa 70 kg/há de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Quando as plantas estavam no estágio V<sub>4</sub> foi realizada uma adubação de cobertura aplicando 90 kg ha<sup>-1</sup> de N via ureia e 60 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> via cloreto de potássio com aplicação superficial sobre o solo. O manejo fitossanitário foi realizado conforme recomendações para a cultura.

A adubação foliar de P foi realizada nos estágios de desenvolvimento descritos na Tabela 2. Em cada tratamento foi utilizada uma dose de 5 kg ha<sup>-1</sup> de MAP Crystal (11-61-00, N, P, K, respectivamente), o que representa 3 kg/há de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> via foliar juntamente com 30 mL de um adjuvante à base de óleo vegetal, diluído em 180 L H<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>. A adubação foliar foi realizada utilizando-se um atomizador aerógrafo acionado por CO<sub>2</sub>, com pressão de trabalho de 1,8 BAR. A barra foi composta por seis pontas espaçadas de 0,5 m com pontas de jato

plano (TT111004VP), operadas a uma altura de 0,5 m do dossel da cultura e velocidade de 1 m s<sup>-1</sup>.

A colheita foi realizada no dia 7 de agosto de 2022

**Tabela 2** – Tratamentos aplicados no cultivo de milho em área experimental

Tratamentos	n° de Repetições	MAP Crystal	Dose (kg ha <sup>-1</sup> )	Estádios de aplicação
<b>T1</b>	4	Sem Aplicação	-	Controle
<b>T2</b>	4	Com Aplicação	5	V <sub>4</sub>
<b>T3</b>	4	Com Aplicação	5	V <sub>6</sub>
<b>T4</b>	4	Com Aplicação	5	V <sub>8</sub>
<b>T5</b>	4	Com Aplicação	5	R <sub>1</sub>
<b>T6</b>	4	Com Aplicação	5 + 5 + 5 + 5	TA: V <sub>4</sub> + V <sub>6</sub> + V <sub>8</sub> + R <sub>1</sub>

TA: Todas as aplicações

## 4.2 Avaliações

### 4.2.1 Estado nutricional das plantas

As análises foram realizadas nas folhas diagnóstico do milho quando as plantas estavam em plena floração [estágio fenológico R<sub>2</sub>; (RITCHIE et al., 1993)]. A folha diagnose para avaliação do estado nutricional foi a folha abaixo e oposta à espiga. Com exceção do N, todos os nutrientes (P, K, Ca, Mg S, Fe, Mn, Cu e Zn) foram digeridos por digestão nitroperclórica e determinados por espectrofotometria de absorção atômica. O nitrogênio foi digerido usando uma solução de extração de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ácido sulfúrico) e determinado pelo método de destilação de Kjeldahl, conforme metodologia descrita pela AOAC (AOAC, 2016).

### 4.2.3 Pigmentos fotossintéticos

Para determinação dos pigmentos fotossintéticos [clorofila *a* (Cl *a*), clorofila *b* (Cl *b*) e carotenoides], foram cortados três discos (0,5 cm de diâmetro) entre a borda e a nervura central da folha (material fresco), seguindo a metodologia proposta por LICHTENTHALER (1987). As leituras foram feitas utilizando espectrofotômetro nos comprimentos de onda de

664, 647 e 480 nm, respectivamente. Os cálculos para as determinações do pigmento seguiram os métodos de WELLBURN (1994).

#### **4.2.4 Trocas gasosas**

Para mensuração das trocas gasosas, utilizou-se um analisador de gás infravermelho (IRGA) CIRAS-3 Portable Photosynthesis System (PP Systems Inc., Amesbury, MA, USA), com leituras na região média das folhas do terço superior das plantas de milho (folhas fotossinteticamente ativas). As leituras foram realizadas após a aplicação dos tratamentos, ao longo do desenvolvimento da cultura. As variáveis determinadas foram: taxa de fotossíntese líquida ( $A$ ), taxa de transpiração foliar ( $E$ ), condutância estomática ( $g_s$ ), concentração de  $\text{CO}_2$  subestomático ( $C_i$ ), eficiência do uso da água (EUA; calculado por  $A/E$ ), e eficiência da carboxilação (calculado por  $A/C_i$ ). As medições foram realizadas entre 8h às 10h da manhã.

#### **4.2.5 Atividade enzimática fotossintética**

Para realizar a avaliação da atividade enzimática, foram coletadas 2 folhas do terço superior das plantas de milho, e colocadas em tubos tipo Falcon. Estas foram acondicionadas em tambor com N líquido durante o transporte, e armazenadas em ultra freezer a  $-80^\circ\text{C}$ , para manter a integridade do material.

A extração da Ribulose-1,5-Bisfosfato Carboxilase/Oxigenase (RuBisCo) foi realizada através da maceração das folhas, sem a nervura central, com N líquido e solução tampão a base de fosfato de potássio. A determinação foi realizada de acordo com metodologia descrita por Reid et al. (1997). As leituras foram feitas em espectrofotômetro, na absorbância de 340 nm (REID et al., 1997). A mensuração do conteúdo de proteína solúvel, seguiram a metodologia descrita por Bradford (1976), em espectrofotômetro a 595 nm. Após a determinação das concentrações de proteínas em cada amostra, foram calculados a atividade da Rubisco, que foi expressa em  $\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg proteína}^{-1}$ .

#### **4.2.6 Carboidratos nas folhas**

As mesmas folhas moídas utilizadas para a determinação do status nutricional das folhas, foram submetidas à determinação de açúcares redutores (frutose e glicose) e sacarose, por meio de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) (BOSSOLANI et al., 2021). A

concentração de amido foi determinada por meio da metodologia decrita por Somogyi-Nelson (NELSON, 1944; SOMOGYI, 1952) com absorbância media em espectrofotômetro a 535 nm.

#### **4.2.7 Estresse oxidativo e enzimas antioxidantes**

As mesmas folhas utilizadas para avaliar os parâmetros de trocas gasosas foram amostradas para avaliar os teores de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e malondialdeído (MDA), e também as atividades das enzimas de superóxido dismutase (SOD; EC:1.15.1.1), catalase (CAT; EC :1.11.1.6), ascorbato peroxidase (APX; EC:1.11.1.11) e conteúdo de prolina nas folhas de milho.

O teor de  $H_2O_2$  foi avaliado de acordo com a metodologia descrita por Alexieva et al. (2001) e o teor foi calculado com base em uma curva de calibração expresso em  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MF (matéria fresca). A peroxidação lipídica (MDA) foi determinada segundo metodologia de Heath; Packer, (1968) e os resultados foram expressos em  $\text{nmol g}^{-1}$  MF. A determinação do teor de SOD foi realizada conforme metodologia de Giannopolitis; Ries, (1977) e os resultados foram expressos em unidades  $\text{mg}^{-1}$  de proteína. A atividade de CAT foi medida de acordo com a metodologia de Azevedo et al., (1998)os resultados foram expressos em  $\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$  de proteína. Para a atividade de APX, utilizou-se a metodologia de Gratão et al. (2008) e os resultados foram expressos em  $\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$  de proteína. Por fim, o teor de prolina foi determinado de acordo com Mauad et al., (2016) e os resultados expressos em  $\mu\text{mol g}^{-1}$  de MF.

#### **4.2.8 Biometria e Produtividade**

Para a realização da biometria dez espigas de milho foram coletadas. Após a coleta, foram determinados o número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira, número de grãos por espiga, e massa de 100 grãos ajustada para 13% de umidade (base úmida). O rendimento de grãos foi determinado pela colheita da área útil experimental (3 linhas de 3 m de comprimento) e ajustado para 13% de umidade (base úmida).

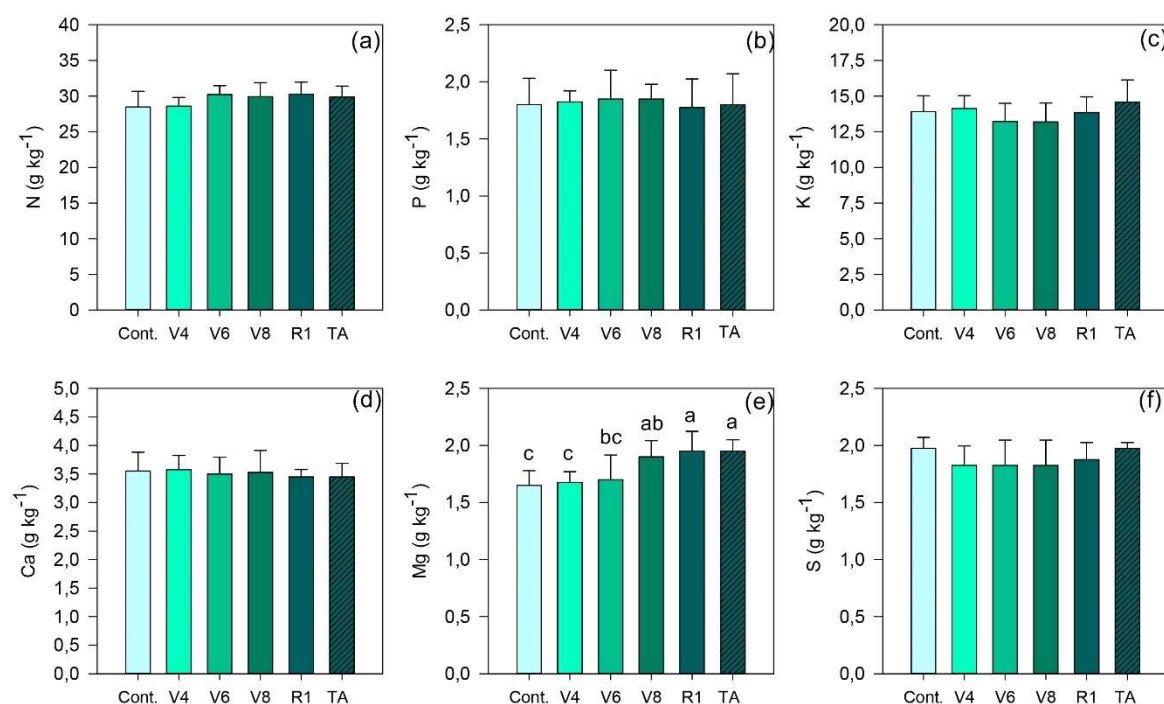
### **4.3 Análise estatística**

As médias foram submetidas ao teste de homoscedasticidade, seguido pelo teste de normalidade de Anderson-Darling (Nelson, 1998). Para avaliar a homogeneidade, o teste de

Levene foi utilizado. Atendidos estes pressupostos, os dados foram submetidos à análise de variância individual (ANOVA) pelo teste F ( $p \leq 0,05$ ) e, quando significativas, analisadas pelo teste t modificado [Diferença mínima significativa protegida de Fisher (LSD) a  $p \leq 0,05$ ].

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores de macronutrientes nas folhas de milho não foram alterados pela aplicação foliar com P, com exceção do Mg, cujas aplicações realizadas nos estágios  $R_1$  e TA incrementaram 18% os teores de Mg em relação ao controle (Fig. 2, e). Este resultado evidencia uma relação entre P e Mg, uma vez que a aplicação de P em estágios estratégicos possibilitou uma maior absorção de Mg pela planta. Um estudo recente reuniu evidências de que P e Mg são sinérgicos e co-limitantes, ou seja, o maior fornecimento de um elemento favorece a absorção de outro, e, a maior disponibilidade de ambos os nutrientes promovem maiores rendimentos produtivos do que quando disponibilizados isoladamente ( $Mg + P > P$  ou  $Mg + P > Mg$ ), respectivamente (WEIH et al., 2021).

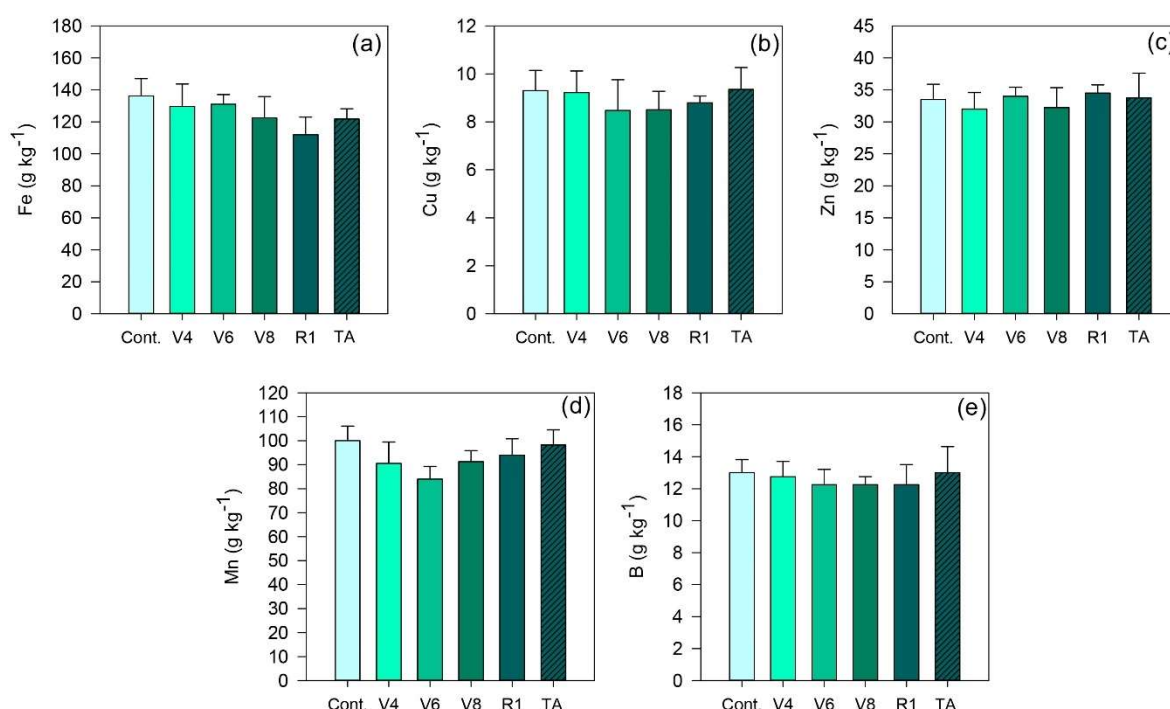


**Figura 2.** Teores foliares de macronutrientes, (a) Nitrogênio, (b) Fósforo, (c) Potássio, (d) Cálcio, (e) Magnésio, (f) enxofre, em função da aplicação foliar de P em diferentes estágios de desenvolvimento de plantas de milho. Cont.: controle, TA: Todas as aplicações ( $V_4 + V_6 + V_8 + R_1$ ). Letras iguais não se diferem pelo teste de LSD ( $p < 0,05$ ). Barra de erros indica desvio padrão ( $n = 4$ ).



Neste trabalho, os teores de P estavam abaixo da faixa considerada adequada conforme descrito por Malavolta et al. (1997) (P: 2,5 a 3,5 g kg<sup>-1</sup>). Ainda que o fornecimento de P constitua um aporte prontamente disponível para a absorção das plantas, a dose aplicada não é suficiente para uma alteração abrupta nos teores de P pelas plantas (DE OLIVEIRA et al., 2019; MOREIRA et al., 2017; RODRIGUES et al., 2021a).

Assim como para os macronutrientes, os valores de micronutrientes não sofreram alterações mediante a aplicação foliar de P (Fig. 3).



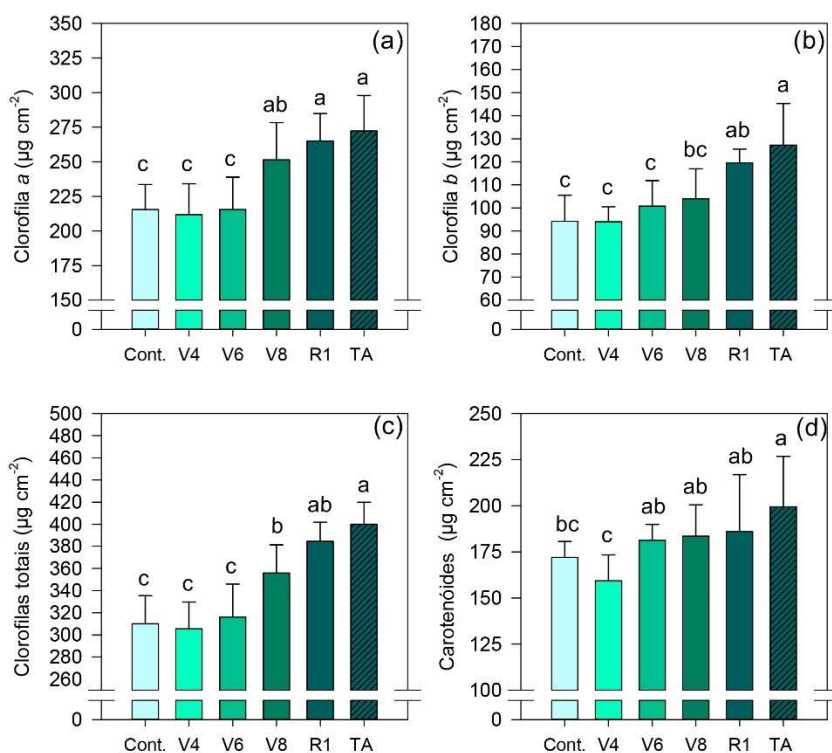
**Figura 3.** Teores foliares de micronutrientes, (a) Ferro, (b) Cobre, (c) Zinco, (d) Manganês, (e) Boro, em função da aplicação foliar de P em diferentes estágios de desenvolvimento de plantas de milho. Cont.: controle, TA: Todas as aplicações: (V<sub>4</sub> + V<sub>6</sub> + V<sub>8</sub> + R<sub>1</sub>). Letras iguais não se diferem pelo teste de LSD ( $p < 0,05$ ). Barra de erros indica desvio padrão (n = 4).

Ainda que os teores foliares de nutrientes pouco tenham sido alterados pela adubação foliar, o fornecimento de P provocou alterações consideráveis no metabolismo fotossintético e antioxidante das plantas de milho.

Os pigmentos fotossintéticos foram expressivamente alterados mediante as aplicações de P, e o nível de resposta foram influenciados pela época de aplicação. As aplicações até o estágio vegetativo V<sub>6</sub> não apresentaram alterações em relação ao controle, porém, as concentrações de clorofila *a*, *b* e clorofilas totais foram significativamente

aumentadas a partir das aplicações realizadas nos estágios V<sub>8</sub>, R<sub>1</sub> e TA (Fig. 4. a, b, c), embora as melhores respostas tenham sido observadas nos dois últimos tratamentos, cujos incrementos da Clorofila *a* foram de 25,14% e 28,6% em relação ao controle, respectivamente. Para a clorofila *b* as aplicações em TA apresentaram o melhor resultado, com incrementos 35% em relação ao controle. Com relação às clorofilas totais, o tratamento TA também se destacou em relação ao controle, embora a aplicação em R<sub>1</sub> não tenha diferido estatisticamente do TA. Sendo assim, os incrementos em relação ao controle foram de 25,85% (R<sub>1</sub>) e 30,93% (TA).

A concentração de carotenoides também foi melhorada pela aplicação de P, principalmente quando aplicado em TA, tendo uma resposta 25% superior em relação ao controle (fig. 4, d).

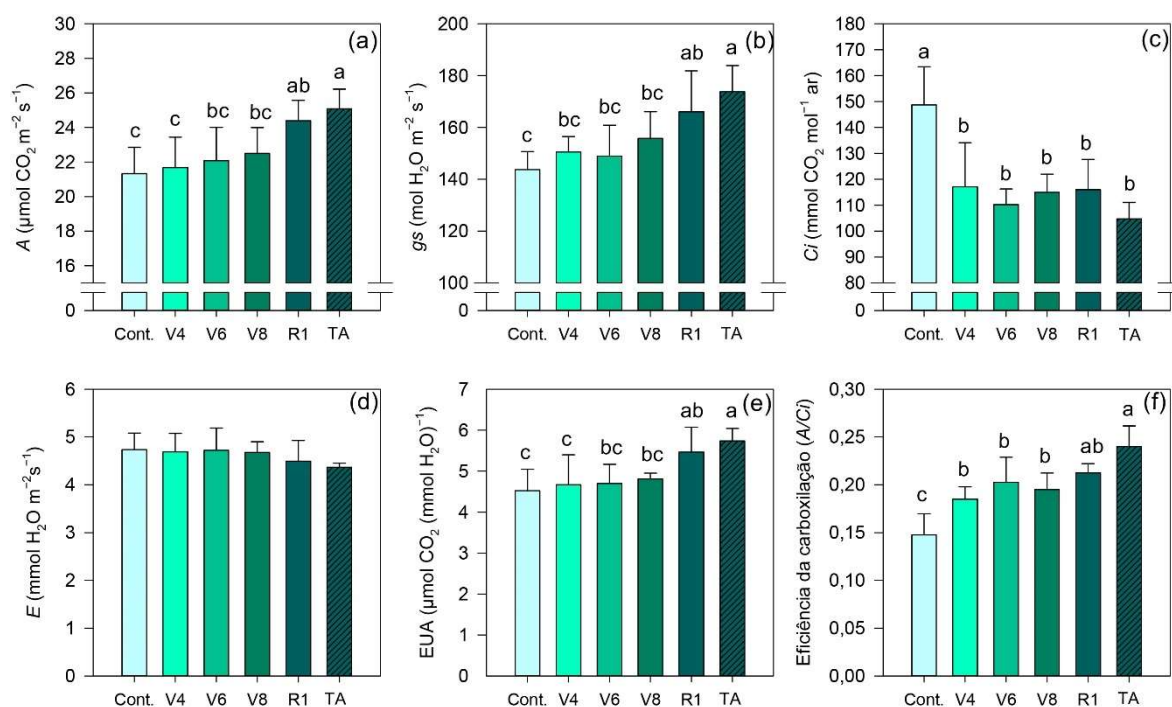


**Figura 4.** Teores de pigmentos fotossintéticos em folhas de milho em função da aplicação foliar de P em diferentes estágios de desenvolvimento. Cont.: controle, TA: Todas as aplicações (V<sub>4</sub> + V<sub>6</sub> + V<sub>8</sub> + R<sub>1</sub>). Letras iguais não se diferem pelo teste de LSD ( $p < 0,05$ ). Barra de erros indica desvio padrão ( $n = 4$ ).

O efeito do P na clorofila pode ser indireto e complexo, podendo influenciar a absorção de nutrientes que afetam a produção de clorofila (LEFEVER et al., 2017). Neste trabalho, os teores de Mg foram aumentados pela aplicação de P, podendo explicar a

melhoria na concentração de clorofilas, uma vez que Mg é componente estrutural destes pigmentos (FIEDOR et al., 2008). Quanto aos carotenoides, o P é requerido para a formação do seu precursor, chamado fiteno, gerado pela dimerização de dois difosfatos de geranilgeranil (CAMAGNA et al., 2019). O aumento no teor dos pigmentos fotossintéticos pode ainda estar relacionado com a presença de N no MAP Crystal (11% N, 61% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). O N é componente estrutural da molécula de clorofila, apresentando quatro moléculas de N no interior do anel tetrapirrólico (TAIZ et al., 2017).

As taxas de fotossíntese líquida (*A*) foram alteradas pela época de aplicação de P. As melhores respostas foram observadas quando as aplicações em TA, seguido pela aplicação em R<sub>1</sub>, cujos incrementos foram de 17,6% e 14,4% em relação ao controle, respectivamente (Fig. 5. a). A condutância estomática (*gs*) também foi favorecida pelo tratamento TA, seguido pela aplicação em R<sub>1</sub>, alcançando incrementos de 20,9% e 15,5%, respectivamente (Fig. 5 b).

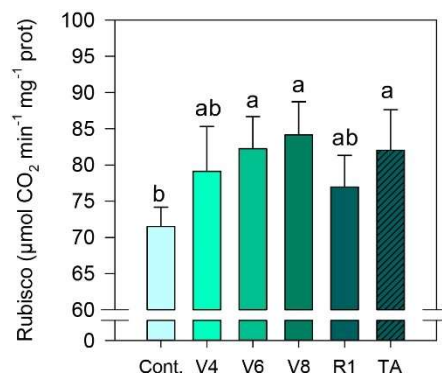


**Figura 5.** Fotossíntese líquida, *A* (a); condutância estomática, *gs* (b); concentração de CO<sub>2</sub> na câmara subestomática, *Ci* (c); transpiração foliar, *E* (d); eficiência do uso da água, *EUA* (e); e eficiência da carboxilação, *A/Ci* (f) de plantas milho sob influência aplicação foliar de P em diferentes estágios de desenvolvimento. Cont.: controle, TA: Todas as aplicações (V<sub>4</sub> + V<sub>6</sub> + V<sub>8</sub> + R<sub>1</sub>). Letras iguais não se diferem pelo teste de LSD ( $p < 0,05$ ). Barra de erros indica desvio padrão ( $n = 4$ ).

Independente da época de aplicação foliar de P, os níveis da concentração interna de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ) decresceram em média 24,3% relação ao controle (Fig. 5, c). Em contrapartida, a eficiência do uso da água foi aumentada em 27% em relação ao controle, quando as aplicações foram realizadas em TA, e 20,66% quando realizada em R<sub>1</sub> (Fig. 5. e). Como consequência da melhoria de  $A$  e redução do  $C_i$ , a aplicação de P em TA provocou um aumento de 37,28% na eficiência da carboxilação ( $A/C_i$ ) em relação ao controle (Fig. 5, f).

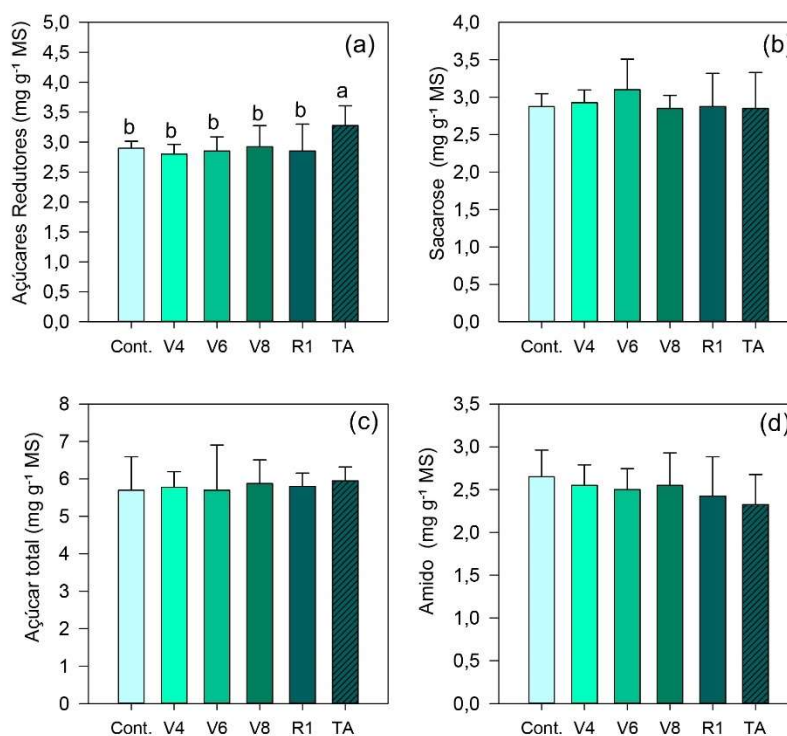
A análise de trocas gasosas revelou uma melhoria na  $g_s$  e um decréscimo na concentração interna de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ) na câmara subestomática, culminando em maior fotossíntese líquida ( $A$ ) e consequentemente maior eficiência da carboxilação ( $A/C_i$ ) mediante a aplicação de P, principalmente quando aplicado em R<sub>1</sub> e TA. O  $g_s$  é uma variável utilizada para mensurar a capacidade de abertura e fechamento estomático, enquanto o  $C_i$  e  $A$  indicam a eficiência da fixação de carbono (FARQUHAR; SHARKEY, 1982). Os estômatos permitem a troca de carbono e água entre o interior da folha e a atmosfera, sendo estes processos fundamentais para a fotossíntese (GAGO et al., 2016). Assim, o aumento do  $g_s$  associado a um decréscimo do  $C_i$  indica que houve uma maior abertura estomática e que o CO<sub>2</sub> que se difundiu para a cavidade substomática foi, em seguida, consumido (assimilado) pelas células do mesófilo (Lawson & Blatt, 2014). O aumento da atividade fotossintética, também foi acompanhada pelo aumento da eficiência do uso da água (EUA), indicando que houve maior assimilação de CO<sub>2</sub> por molécula de água consumida, ou seja, a planta foi capaz de realizar mais fotossíntese utilizando a mesma quantidade de água, tendo em vista que a transpiração não foi alterada ( $EUA = A/E$ ).

A aplicação de P, independente da época de aplicação, provocou incrementos na atividade da Rubisco, sendo que os resultados mais expressivos foram observados quando aplicados em V<sub>6</sub>, V<sub>8</sub> e TA, cujos incrementos foram de 15%, 17,69% e 14,69% comparados ao controle, respectivamente (Fig. 6). O P é um componente estrutural da enzima Rubisco (Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase) e o seu fornecimento é fundamental garantir a ativação e a capacidade de regeneração desta enzima (BROOKS; WOO; WONG, 1988). Além disso, o N presente no MAP também pode ter influenciado na atividade da Rubisco, considerando que o N é fundamental para a síntese e atividade desta enzima, afetando consequentemente sua capacidade de assimilação de CO<sub>2</sub> durante o ciclo de Calvin (JIN et al., 2015).



**Figura 6.** Atividade da enzima Rubisco em plantas de milho sob influência da aplicação foliar de P em diferentes estágios de desenvolvimento. Cont.: controle, TA: Todas as aplicações: (V<sub>4</sub> + V<sub>6</sub> + V<sub>8</sub> + R<sub>1</sub>). Letras iguais não se diferem pelo teste de LSD ( $p < 0,05$ ). Barra de erros indica desvio padrão ( $n = 4$ ).

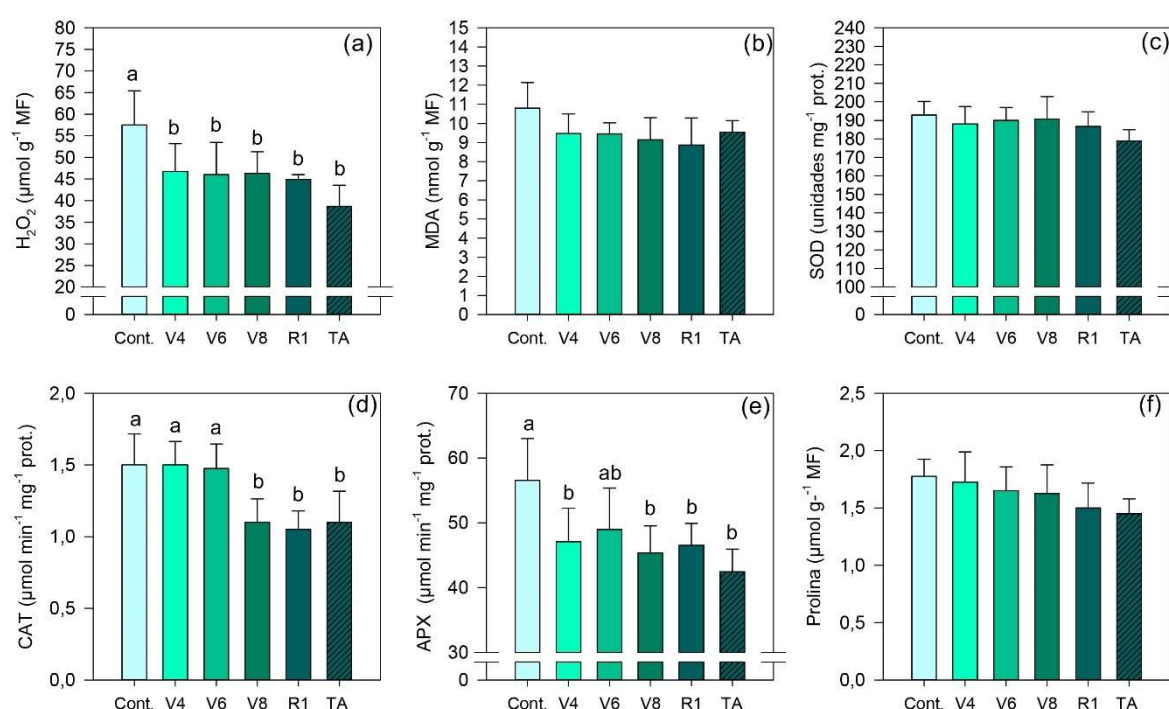
Com relação à concentração de carboidratos nas folhas, apenas os açúcares redutores foram afetados pela aplicação de P. Em média, a aplicação em TA aumentou 14,24% em relação aos demais tratamentos (Fig. 7, a).



**Figura 7.** Teores de carboidratos em folhas de milho sob influência da aplicação foliar de P em diferentes estágios de desenvolvimento. Cont.: controle, TA: Todas as aplicações (V<sub>4</sub> + V<sub>6</sub> + V<sub>8</sub> + R<sub>1</sub>). Letras iguais não se diferem pelo teste de LSD ( $p < 0,05$ ). Barra de erros indica desvio padrão ( $n = 4$ ).

O fornecimento de P em estágios de desenvolvimento estratégicos não melhorou somente as trocas gasosas e o metabolismo do carbono, mas também contribuiu para a

redução do estresse das plantas de milho. Os níveis de peróxido de hidrogênio decresceram com a aplicação de P independente da época de aplicação, com uma redução média de 22,5% em relação ao controle (Fig. 8. a). A atividade da catalase foi reduzida apenas a partir da aplicação em V<sub>8</sub>. Em média, os tratamentos V<sub>8</sub>, R<sub>1</sub> e TA apresentaram uma redução de 27% em relação aos demais tratamentos (Fig. 8, d). Os valores de APX também foram reduzidos com a aplicação de P, apresentando valores em média 18,5% menores comparados ao tratamento controle (Fig. 8, e). As demais variáveis não foram alteradas pela aplicação foliar de P.

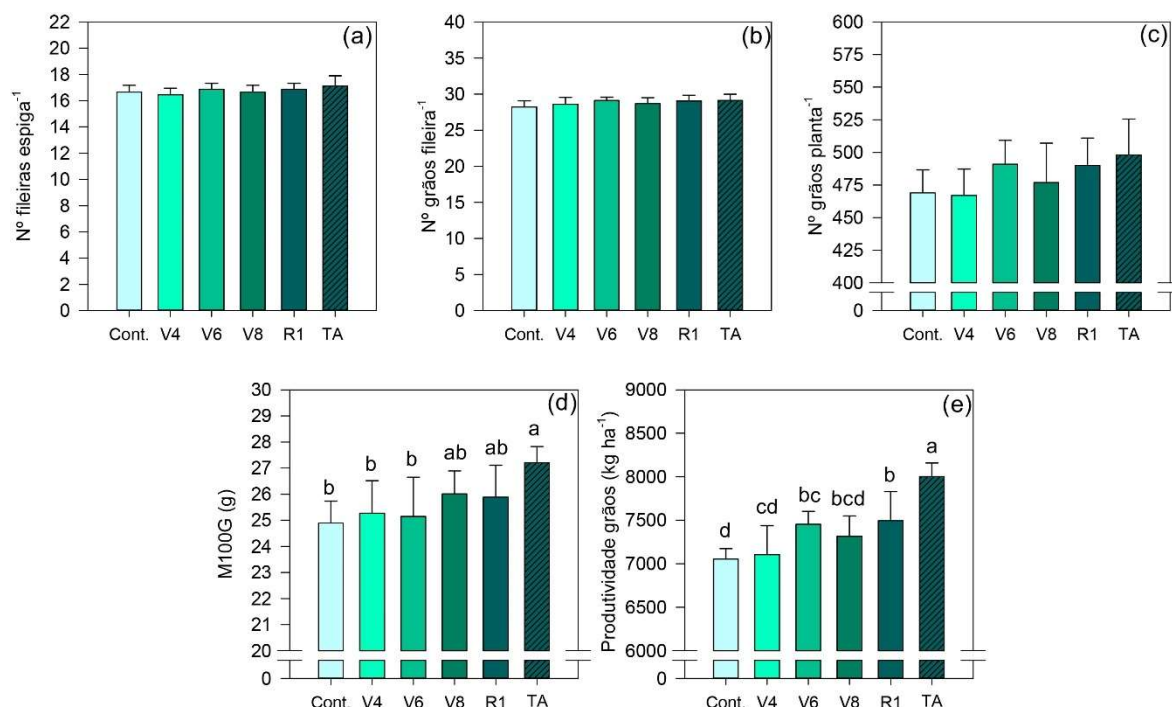


**Figura 8.** Peróxido de oxigênio (a), malondialdeído (b), superóxido dismutase (c), catalase (d), ascorbato peroxidase (e) e concentração de prolina (f) em plantas de milho sob influência da aplicação de P em diferentes estágios de desenvolvimento. Cont.: controle, TA: Todas as aplicações: (V<sub>4</sub> + V<sub>6</sub> + V<sub>8</sub> + R<sub>1</sub>). Letras iguais não se diferem pelo teste de LSD ( $p < 0,05$ ). Barra de erros indica desvio padrão ( $n = 4$ ).

O peróxido de hidrogênio H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> é uma molécula sinalizadora envolvida em diferentes respostas celulares, como a regulação do crescimento de plantas, no entanto, quando presentes em altas concentrações no citosol podem causar danos celulares (SOFO et al., 2015). Portanto, o aumento das concentrações de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sob baixa concentração de P podem indicar a presença de estresse devido à peroxidação lipídica das membranas celulares (TARUMOTO et al., 2022). Por outro lado, a baixa concentração de enzimas antioxidantes

observadas neste trabalho, associado à baixa concentração de  $H_2O_2$  indicam que havia menos formação de EROs, logo, uma menor quantidade de substrato para que estas enzimas atuem, evidenciando que as plantas tratadas com P se encontravam menos estressadas, principalmente nos estágios mais avançados da cultura ou em TA.

Os valores de número de fileiras, número de grãos por fileira e número de grãos planta<sup>-1</sup> não sofreram alteração significativa mediante à aplicação foliar de P (Fig. 9. a, b e c). Contudo, a massa de mil (1000) grãos e produtividade de grãos foram positivamente afetados pelas épocas de aplicação foliar de P. Quanto ao M100G, as melhores respostas foram obtidas pelo tratamento TA, cujo incremento foi de 9,3% em relação ao controle (Fig. 9. d).



**Figura 9.** Número de fileiras por espiga (a), número de grãos por espiga (b), número de grãos por planta (c), Massa de cem grãos (d) e produtividade de grãos (d) em plantas de milho sob influência da aplicação de P em diferentes estágios de desenvolvimento. Cont.: controle, TA: Todas as aplicações ( $V_4 + V_6 + V_8 + R_1$ ). Letras iguais não se diferem pelo teste de LSD ( $p < 0,05$ ). Barra de erros indica desvio padrão ( $n = 4$ ).

Com relação à produtividade de grãos (Fig. 9. e), a melhor resposta à aplicação de P foi observada no tratamento TA, com 8001,2 kg ha<sup>-1</sup> seguido pela aplicação em R<sub>1</sub>, cuja a produtividade foi de 7496,25 kg ha<sup>-1</sup>. Em contrapartida, o tratamento controle alcançou uma produtividade de 7053,5 kg ha<sup>-1</sup>. Portanto, houve um incremento de 947,7 kg ha<sup>-1</sup> (13,4%) e



442,75 kg ha<sup>-1</sup> (6,3%) com a aplicação de P, em TA e em R<sub>1</sub>, respectivamente, comparados ao controle.

O aumento da produtividade de grãos foi resultado da maior atividade fotossintética, que associada à maior atividade da Rubisco, promoveram uma maior concentração de açúcares, principalmente quando aplicado em TA. Esta maior produção de açúcar pode ter sido translocada das folhas para os grãos, explicando o aumento de M100G, que, conseqüentemente, culminou em uma maior produtividade de grãos (OLIVEIRA et al., 2022).

De modo geral, observa-se que quanto mais tardia a aplicação de P maiores as chances de resposta do metabolismo fotossintético, antioxidante e produtivo das plantas de milho. Isto pode ser explicado pelo fato de que a taxa de absorção e acúmulo de P é maior próximo ao início do estágio reprodutivo (BENDER et al., 2013). Porém, as diversas aplicações de P ao longo do desenvolvimento vegetativo e florescimento (TA: V<sub>4</sub> + V<sub>6</sub> + V<sub>8</sub> + R<sub>1</sub>) promoveram os melhores resultados, uma vez que permitiu maior aporte do nutriente ao longo do ciclo de desenvolvimento do milho.

## 6. CONCLUSÕES

A aplicação foliar de MAP foi eficiente em aumentar a síntese de clorofilas e carotenoides, melhorando a atividade fotossintética, o metabolismo do carbono e antioxidante, culminando em maior produtividade de grãos.

As aplicações foliares mais tardias de MAP promoveram respostas metabólicas mais eficientes, porém, a maior resposta foi obtida quando as aplicações ocorreram em todos os estágios de desenvolvimento estudados (V<sub>4</sub> + V<sub>6</sub> + V<sub>8</sub> + R<sub>1</sub>).

As respostas fisiológicas observadas podem ser atribuídas não somente ao fornecimento de P, mas o N presente na formulação do MAP também pode ter contribuído para a melhoria da atividade fotossintética e produtiva da cultura do milho.

A aplicação foliar de MAP é uma estratégia de manejo viável para ser implementada na produção do milho de segunda safra, sendo um eficiente estimulante do metabolismo do carbono e antioxidante, ficando a viabilidade econômica a ser estudada para implementação efetiva em lavouras comerciais.



## REFERÊNCIAS

ALEXIEVA, V. et al. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell & Environment**, v. 24, n. 12, p. 1337–1344, 1 dez. 2001.

AOAC. **Official methods of analysis of AOAC International**. Rockville, MD: AOAC International, ISBN: 978-0-935584-87-5, 2016.

AZEVEDO, R. A. et al. Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. **Physiologia Plantarum**, v. 104, n. 2, p. 280–292, 1 out. 1998.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. [s.l.] John Wiley & Sons, 1995.

BENDER, R. R. et al. Modern Corn Hybrids' Nutrient Uptake Patterns. **Better Crops**, v. 97, n. 1, p. 7–10, 2013.

BIELESKI, R. L. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. **Annual review of plant physiology**, v. 24, n. 1, p. 225–252, 1973.

BOSSOLANI, J. W. et al. Thermomagnesium: A By-Product of Ni Ore Mining as a Clean Fertilizer Source for Maize. **Agronomy** **2021**, Vol. 11, Page 525, v. 11, n. 3, p. 525, 11 mar. 2021.

BROOKS, A.; WOO, K. C.; WONG, S. C. Effects of phosphorus nutrition on the response of photosynthesis to CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>, activation of ribulose biphosphate carboxylase and amounts of ribulose biphosphate and 3-phosphoglycerate in spinach leaves. **Photosynthesis Research** **1988** **15:2**, v. 15, n. 2, p. 133–141, fev. 1988.

CAMAGNA, M. et al. Enzyme Fusion Removes Competition for Geranylgeranyl Diphosphate in Carotenogenesis. **Plant Physiology**, v. 179, n. 3, p. 1013–1027, 26 fev. 2019.

CARSTENSEN, A. et al. The Impacts of Phosphorus Deficiency on the Photosynthetic Electron Transport Chain. **Plant Physiology**, v. 177, n. 1, p. 271–284, 2 maio 2018.

CHADDAD, F. Enabling Conditions. **The Economics and Organization of Brazilian Agriculture**, p. 19–44, 1 jan. 2016.

DE BANG, T. C. et al. The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. **New Phytologist**, v. 229, n. 5, p. 2446–2469, 1 mar. 2021.

DE OLIVEIRA, S. M. et al. Grain yield, efficiency and the allocation of foliar N applied to soybean canopies. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 4, p. 305–310, 1 jul. 2019.

DOS SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [s.l.] Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.

ERENSTEIN, O. The Evolving Maize Sector in Asia: Challenges and Opportunities. <http://dx.doi.org/10.1080/15228860903517770>, v. 11, n. 1, p. 1–15, jan. 2010.

ERENSTEIN, O. et al. Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. **Food Security** 2022 14:5, v. 14, n. 5, p. 1295–1319, 17 maio 2022.

FAGERIA, N. K. et al. Foliar Fertilization of Crop Plants. <http://dx.doi.org/10.1080/01904160902872826>, v. 32, n. 6, p. 1044–1064, jun. 2009.

FARQUHAR, G. D.; SHARKEY, T. D. Stomatal Conductance and Photosynthesis. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 33, n. 1, p. 317–345, 1982.

FERNÁNDEZ, V.; BROWN, P. H. From plant surface to plant metabolism: The uncertain fate of foliar-applied nutrients. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, n. JUL, p. 289, 31 jul. 2013.

FIEDOR, L. et al. Understanding chlorophylls: Central magnesium ion and phytyl as structural determinants. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, v. 1777, n. 12, p. 1491–1500, 1 dez. 2008.

FINK, J. R. et al. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, n. 3, p. 379–387, 19 fev. 2014.

FINK, J. R. et al. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 62–68, 1 jan. 2016.

FURBANK, R. T.; FOYER, C. H.; WALKER, D. A. Regulation of photosynthesis in isolated spinach chloroplasts during orthophosphate limitation. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, v. 894, n. 3, p. 552–561, 17 dez. 1987.

GAGO, J. et al. Relationships of leaf net photosynthesis, stomatal conductance, and mesophyll conductance to primary metabolism: A multispecies meta-analysis approach. **Plant Physiology**, v. 171, n. 1, p. 265–279, 2016.

GARCÍA-LARA, S.; SERNA-SALDIVAR, S. O. Corn History and Culture. **Corn: Chemistry and Technology**, 3rd Edition, p. 1–18, 1 jan. 2019.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide Dismutases I. Occurrence in Higher Plants. **Plant Physiology**, v. 59, n. 2, p. 309–314, 1 fev. 1977.

GIRMA, K. et al. Determination of optimum rate and growth stage for foliar-applied phosphorus in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 38, n. 9–10, p. 1137–1154, 2007.

GIRMA, K. et al. Determination of Optimum Rate and Growth Stage for Foliar-Applied Phosphorus in Corn. <http://dx.doi.org/10.1080/00103620701328016>, v. 38, n. 9–10, p. 1137–1154, maio 2010.

GÖRLACH, B. M.; MÜHLING, K. H. Phosphate foliar application increases biomass and P concentration in P deficient maize. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 184, n. 3, p. 360–370, 1 jun. 2021.

GRATÃO, P. L. et al. Acquired tolerance of tomato (*Lycopersicon esculentum* cv. Micro-Tom) plants to cadmium-induced stress. **Annals of Applied Biology**, v. 153, n. 3, p. 321–333, 1 dez. 2008.

GROTE, U. et al. Food Security and the Dynamics of Wheat and Maize Value Chains in Africa and Asia. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 317, 3 fev. 2021.

HALSTED, M.; LYNCH, J. Phosphorus responses of C3 and C4 species. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, n. 4, p. 497–505, 1996.

HAMMOND, J. P.; WHITE, P. J. Sucrose transport in the phloem: integrating root responses to phosphorus starvation. **Journal of Experimental Botany**, v. 59, n. 1, p. 93–109, 1 jan. 2008.

HEATH, R. L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 125, n. 1, p. 189–198, 1 abr. 1968.

HELDT, H. W. et al. Role of Orthophosphate and Other Factors in the Regulation of Starch Formation in Leaves and Isolated Chloroplasts. **Plant Physiology**, v. 59, n. 6, p. 1146–1155, 1 jun. 1977.

HERNÁNDEZ, I.; MUNNÉ-BOSCH, S. Linking phosphorus availability with photo-oxidative stress in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 10, p. 2889–2900, 1 maio 2015.

JIN, X. et al. Effects of nitrogen stress on the photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation, chlorophyll fluorescence and sugar-nitrogen ratio in corn. **Scientific Reports** 2015 5:1, v. 5, n. 1, p. 1–9, 1 abr. 2015.

KURIHARA, C. H. et al. Gradual correction of phosphorus availability in the no-tillage system. **Revista Ceres**, v. 63, n. 2, p. 256–264, 2016.

- LEFEVER, K. et al. Effects of pH and Phosphorus Concentrations on the Chlorophyll Responses of *Salvia chamelaeagnea* (Lamiaceae) Grown in Hydroponics. **Chlorophyll**, 10 maio 2017.
- LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. **Methods in Enzymology**, v. 148, n. C, p. 350–382, 1987.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. DE. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafós, 1997.
- MARDAMOOTOO, T.; DU PREEZ, C. C.; BARNARD, J. H. Phosphorus management issues for crop production: A review. **African Journal of Agricultural Research**, v. 17, n. 7, p. 939–952, 2021.
- MARSCHNER, H. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. [s.l.] Academic press, 2011.
- MAUAD, M. et al. Effects of silicon and drought stress on biochemical characteristics of leaves of upland rice cultivars. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 3, p. 532–539, 13 abr. 2016.
- MENGEL, K. et al. Phosphorus. **Principles of Plant Nutrition**, p. 453–479, 2001.
- MOREIRA, A. et al. Soybean Yield and Nutritional Status Response to Nitrogen Sources and Rates of Foliar Fertilization. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 2, p. 629–635, 1 mar. 2017.
- MOSALI, J. et al. Effect of Foliar Application of Phosphorus on Winter Wheat Grain Yield, Phosphorus Uptake, and Use Efficiency. <http://dx.doi.org/10.1080/01904160600972811>, v. 29, n. 12, p. 2147–2163, 1 dez. 2006.
- NACHTIGAÜ, G. R.; NAVA, G. Adubação foliar: Fatos e mitos. Em: [s.l.: s.n.].
- NELSON, N. A PHOTOMETRIC ADAPTATION OF THE SOMOGYI METHOD FOR THE DETERMINATION OF GLUCOSE. 1944.
- NUNES, R. DE S. et al. Distribution of Soil Phosphorus Fractions as a Function of Long-Term Soil Tillage and Phosphate Fertilization Management. **Frontiers in Earth Science**, v. 8, p. 350, 2 set. 2020.
- OLIVEIRA, S. L. et al. Molybdenum Foliar Fertilization Improves Photosynthetic Metabolism and Grain Yields of Field-Grown Soybean and Maize. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1633, 25 maio 2022.
- POOLE, N.; DONOVAN, J.; ERENSTEIN, O. Viewpoint: Agri-nutrition research: Revisiting the contribution of maize and wheat to human nutrition and health. **Food Policy**, v. 100, p. 101976, 1 abr. 2021.

PRIMAVESI, O. Conceito de adubação foliar estimulante. **Embrapa Pecuária Sudeste-Artigo de divulgação na mídia (INFOTECA-E)**, 1978.

RAGHOTHAMA, K. G. PHOSPHATE ACQUISITION. **Annual review of plant physiology and plant molecular biology**, v. 50, p. 665–693, 1999.

RATHNA PRIYA, T. S.; MANICKAVASAGAN, A. Characterising corn grain using infrared imaging and spectroscopic techniques: a review. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 15, n. 4, p. 3234–3249, 2021.

REID, C. D. et al. Comparison of spectrophotometric and radioisotopic methods for the assay of Rubisco in ozone-treated plants. **Physiologia Plantarum**, v. 101, n. 2, p. 398–404, 1997.

REZENDE, P. M. DE et al. Adubação foliar: I. Épocas de aplicação de fósforo na cultura da soja. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 6, p. 1105–1111, dez. 2005.

RITCHIE, S. W. et al. How a corn plant develops. Spec. Rep. 48. Iowa State Univ. **Coop. Ext. Serv.**, Ames, 1993.

RODRIGUES, V. A. et al. Foliar nitrogen as stimulant fertilization alters carbon metabolism, reactive oxygen species scavenging, and enhances grain yield in a soybean–maize rotation. **Crop Science**, v. 61, n. 5, p. 3687–3701, 1 set. 2021a.

RODRIGUES, V. A. et al. Foliar nitrogen as stimulant fertilization alters carbon metabolism, reactive oxygen species scavenging, and enhances grain yield in a soybean–maize rotation. **Crop Science**, v. 61, n. 5, p. 3687–3701, 1 set. 2021b.

ROSOLEM, C. A. **Recomendação e aplicação de nutrientes via foliar**. LAVRASUFLA/FAEP, 2002.

SHARPLEY, A. N. et al. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options. 1994.

SHIFERAW, B. et al. Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. **Food Security**, v. 3, n. 3, p. 307–327, 23 set. 2011.

SOFO, A. et al. Ascorbate Peroxidase and Catalase Activities and Their Genetic Regulation in Plants Subjected to Drought and Salinity Stresses. **International Journal of Molecular Sciences** 2015, **Vol. 16, Pages 13561-13578**, v. 16, n. 6, p. 13561–13578, 12 jun. 2015.

SOLTANGHEISI, A. et al. Improving phosphorus sustainability of sugarcane production in Brazil. **Gcb Bioenergy**, v. 11, n. 12, p. 1444–1455, 2019.

SOMOGYI, M. Notes on sugar determination. 1952.

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. **FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin**, v. 18, n. 108, 2008.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Amsterdã, Artmed Editora, 2017.

TARUMOTO, M. B. et al. Carbohydrate Partitioning and Antioxidant Substances Synthesis Clarify the Differences Between Sugarcane Varieties on Facing Low Phosphorus Availability. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1414, 11 maio 2022.

THORNE, G. N. The Effect of Applying a Nutrient in Leaf Sprays on the Absorption of the Same Nutrient by the Roots. **Journal of Experimental Botany**, v. 8, n. 3, p. 401–412, 1 jan. 1957.

VAN RAIJ, B. et al. **Os métodos de análise química do sistema IAC de análise de solo no contexto nacional**. Campinas: 2001.

WEIH, M. et al. Evidence for magnesium–phosphorus synergism and co-limitation of grain yield in wheat agriculture. **Scientific Reports 2021 11:1**, v. 11, n. 1, p. 1–13, 27 abr. 2021.

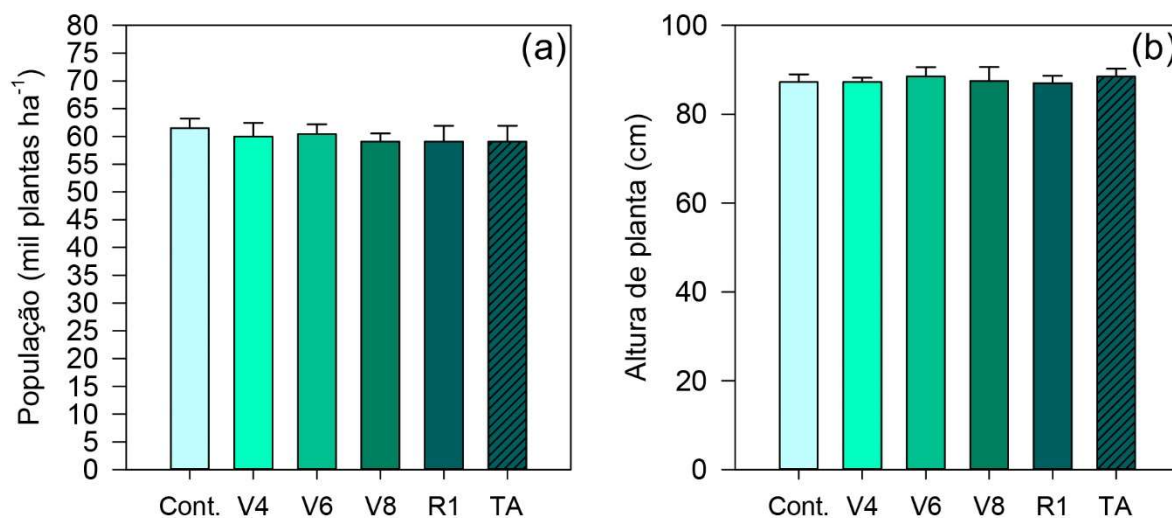
WELLBURN, A. R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. **Journal of Plant Physiology**, v. 144, n. 3, p. 307–313, 1994.

WITHERS, P. J. A. et al. Feed the crop not the soil: Rethinking phosphorus management in the food chain. **Environmental Science and Technology**, v. 48, n. 12, p. 6523–6530, 17 jun. 2014.

WITHERS, P. J. A. et al. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1–13, 2018.

ZAMBROSI, F. C. Foliar Phosphorus Applications in the Forms of Phosphate and Phosphite Have Contrasting Effects on Wheat Performance Under Field Conditions. **Journal of Crop Science and Biotechnology 2019 22:5**, v. 22, n. 5, p. 395–401, 7 nov. 2019.

## ANEXOS



**Figura 10.** População final de plantas (a) e Altura de plantas de milho (b) submetidas à adubação foliar com Fósforo. Cont. Controle, TA: Todas as aplicações: V4+V6+V8+R1



**Figura 11.** Aplicação foliar de P em plantas de milho (estágio V<sub>4</sub>)



**Figura 12.** Plantas de milho em estágio V4 após adubação de cobertura



**Figura 13.** Aplicação foliar durante o florescimento de milho (R<sub>1</sub>)





**Figura 14.** Avaliação de trocas gasosas



**Figura 15.** Coleta de espigas de milho no momento da colheita.