

**UniRV - UNIVERSIDADE DE RIO VERDE**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM CULTIVO SEQUENCIAL DE  
PLANTAS DE SOJA, MILHO E BRAQUIÁRIA UTILIZANDO  
ESTRUVITA**

**MATEUS DE MELO RAMOS**  
*Magister Scientiae*

**RIO VERDE**  
**GOIÁS – BRASIL**  
**2025**

**MATEUS DE MELO RAMOS**

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM CULTIVO SEQUENCIAL DE PLANTAS DE  
SOJA, MILHO E BRAQUIÁRIA UTILIZANDO ESTRUVITA**

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de  
Rio Verde, como parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção  
do título de *Magister Scientiae*

**RIO VERDE  
GOIÁS – BRASIL  
2025**

Universidade de Rio Verde  
Biblioteca Luiza Carlinda de Oliveira  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – (CIP)

R144d

Ramos, Mateus de Melo

Disponibilidade de fósforo em cultivo sequencial de plantas de soja, milho e braquiária utilizando estruvita. / Mateus de Melo Ramos. – 2025. 67 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. June Faria Scherrer Menezes.  
Coorientador: Prof. Dr. Ricardo de Castro Dias.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Rio Verde - UniRV, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, 2025.

Inclui índice de figuras e tabelas.

1. Aproveitamento de resíduos. 2. Fertilizante. 3. Fosfato de cálcio. 4. Fonte renovável de fósforo. I. Menezes, June Faria Scherrer. II. Dias, Ricardo de Castro. III. Título.

CDD: 631.85


Bibliotecário: Juatan Tiago da Silva – CRB 1/3158

Mateus de Melo Ramos

**ESTRUVITA COMO FONTE DE FÓSFORO EM LATOSSOLO NO CULTIVO SEQUENCIAL DE SOJA, MILHO E BRAQUIÁRIA**

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVAÇÃO: 22 de agosto de 2025

Documento assinado digitalmente  
 **JUNE FARIA SCHERRER MENEZES**  
Data: 09/09/2025 08:49:00-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>


---

Prof.a. Dra. June Faria Scherrer Menezes  
Orientadora. Membro – PPGPV/UniRV

Documento assinado digitalmente  
 **RICARDO DE CASTRO DIAS**  
Data: 29/08/2025 11:31:55-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Dr. Ricardo de Castro Dias  
Coorientador - PPGPV/UniRV -

Documento assinado digitalmente  
 **CAIO DE TEVES INACIO**  
Data: 02/09/2025 15:51:58-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>


---

Dr. Caio de Teves Inacio  
Membro Externo – Embrapa Agrobiologia

Assinado de forma digital por  
**PAULO FERNANDES**  
**BOLDRIN:32723756866**  
Dados: 2025.09.08 08:11:17 -03'00'


---

Prof. Dr. Paulo Fernandes Boldrin  
Membro – PPGPV/UniRV

Documento assinado digitalmente  
 **JOAQUIM JULIO DE ALMEIDA JUNIOR**  
Data: 02/09/2025 19:39:21-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Prof. Dr. Joaquim Júlio de Almeida Júnior  
Membro Externo – UniFimes

Documento assinado digitalmente  
 **RAQUEL DE SOUSA NETA**  
Data: 09/09/2025 08:56:02-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Dra. Raquel de Sousa Neta  
Membro – PPGPV/UniRV

## DEDICATÓRIA

A Deus, que me deu saúde, força e sabedoria para a conclusão do curso de Mestrado em Produção Vegetal da UniRV. Sou grato por todas as bênçãos concedidas!

A minha esposa, pelo companheirismo e apoio de sempre.

A minha orientadora June Faria Scherrer Menezes, pela paciência ao me orientar e incentivo desde a graduação tornando possível a conclusão deste trabalho.

Aos estudantes da graduação em Agronomia Carlos Eduardo Vieira de Oliveira e Matheus Borba Silva, pelo auxílio na condução do experimento na casa de vegetação.

Ao meu coorientador Ricardo de Castro Dias, pelo apoio na execução da estatística e na conclusão deste trabalho.

Ao Dr. Caio de Teves Inácio, pela coordenação do projeto em Rede Estruvita , aprovado pelo CNPq.

Ao CNPq, pela bolsa do por ter me auxiliado.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde, força e sabedoria concedidas nesta caminhada.

A minha esposa, pelo apoio e incentivo fundamentais.

A minha orientadora, Profa. Dra. June Faria Scherrer Menezes, e ao coorientador, Prof. Dr. Ricardo Dias, pelos ensinamentos e contribuições essenciais.

Aos professores e colegas, que colaboraram direta ou indiretamente.

Ao Dr. Caio de Teves Inácio, pela coordenação geral do projeto Estruvita aprovado e financiado pelo CNPq.

À UniRV, ao PPGPV, ao CNPq e a Embrapa, pela oportunidade de participar destas instituições preciosas, por dois anos.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, minha sincera gratidão!

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Cultura da Soja.....	2
2.2 Cultura do Milho.....	3
2.3 Cultura da braquiária.....	4
2.4 Importância do fósforo para as plantas.....	5
2.5 Impactos ambientais dos dejetos suínos.....	6
2.6 Aplicações da estruvita na agricultura.....	7
2.7 Comparação com fertilizantes tradicionais: vantagens e desvantagens.....	9
2.8 Impactos ambientais e benefícios econômicos: reciclagem de nutrientes, ODS e sustentabilidade.....	10
2.8.1 Impactos ambientais.....	10
2.8.2 Benefícios econômicos.....	11
2.8.3 Sustentabilidade e agricultura circular.....	12
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	12
3.1 Área experimental.....	12
3.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	13
3.3 Condução dos ensaios em cultivos sucessivos.....	14
3.4 Análises estatísticas.....	15
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
4.1 Altura de plantas de soja, milho e braquiária.....	17
4.2 Índice de Clorofila (SPAD).....	19
4.3 Matéria seca da parte aérea das plantas de soja, milho e braquiária.....	21
4.4 Acúmulo de nitrogênio na parte aérea.....	24
4.5 Acúmulo de fósforo na parte aérea.....	25

4.6 Acúmulo de macronutrientes na parte aérea das plantas de soja, de milho e de braquiária .....	27
4.7 Crescimento e acúmulo de nutrientes na massa seca da parte aérea das culturas.....	28
4.8 Acúmulo de nutrientes na braquiária no terceiro cultivo.....	31
4.9 Produção de matéria seca e biodisponibilidade de fósforo acumulado nos três cultivos.....	32
4.10 Fósforo residual no solo após os três cultivos.....	33
4.11 Análise canônica para o cultivo de soja.....	35
4.12 Análise canônica para o milho (2º cultivo).....	36
4.13 Análise canônica para a braquiária (3º cultivo).....	38
4.14 Análise canônica para os atributos químicos residuais no solo.....	39
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
6 CONCLUSÕES.....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Atributos químicos iniciais do solo na camada de 0,00–0,20 m.....	13
TABELA 2	Composição química das fontes de fósforo utilizadas.....	14
TABELA 3	Altura de plantas (cm) de braquiária os 45 dias após a semeadura em função das fontes de fósforo (P).....	19
TABELA 4	Massa seca da parte aérea (g) de plantas de braquiária em função dos residuais das fontes e doses de fósforo (P) após 135 dias da aplicação.....	22

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Altura de plantas de soja em função das adubações aos 15, 30 e 45 dias após a aplicação dos fertilizantes.....	17
FIGURA 2	Altura de plantas de milho em função das adubações aos 15, 30 e 45 dias após a aplicação dos fertilizantes.....	18
FIGURA 3	Índice de clorofila nas plantas de soja, milho e braquiária, em função das adubações aos 45 dias (soja), aos 90 dias (milho) e aos 135 dias (braquiária), após aplicação dos fertilizantes.....	20
FIGURA 4	Produção de massa seca da parte aérea nas plantas de soja (A) e milho (B) em função das adubações aos 45 dias (soja) e aos 90 dias (milho) após a aplicação dos fertilizantes.....	21
FIGURA 5	Acúmulo de nitrogênio de massa seca da parte aérea nas plantas de soja, milho e braquiária (C) em função das adubações aos 45 dias (soja), aos 90 dias (milho) e aos 135 dias (braquiária) após a aplicação dos fertilizantes.....	25
FIGURA 6	Acúmulo de fósforo de massa seca da parte aérea nas plantas de soja e milho em função das adubações aos 45 dias (soja) e aos 90 dias (milho) após a aplicação dos fertilizantes.....	26
FIGURA 7	Acúmulo dos nutrientes K, Ca, Mg e S ne massa seca da parte aérea das plantas de soja em função das adubações.....	27
FIGURA 8	Acúmulo dos nutrientes K, Ca, Mg e S ne massa seca da parte aérea das plantas de milho em função das adubações.....	28
FIGURA 9	Acúmulo dos nutrientes K, Ca, Mg e S ne massa seca da parte aérea das plantas de braquiária em função das adubações.....	28
FIGURA 10	Acúmulo de nutrientes de massa seca da parte aérea das plantas de soja em função das doses de fósforo.....	29
FIGURA 11	Acúmulo de nutrientes de massa seca da parte aérea das plantas de milho em função das doses de fósforo.....	30
FIGURA 12	Acúmulo de nutrientes de massa seca da parte aérea das plantas de braquiária em função das doses de fósforo.....	31

FIGURA 13	Massa seca total da parte aérea das plantas nos três cultivos e biodisponibilidade de P em função dos fertilizantes.....	32
FIGURA 14	Fósforo residual no solo após os cultivos sucessivos de soja e milho em função das adubações aos 135 dias após a aplicação dos fertilizantes.....	34
FIGURA 15	Análise canônica para o cultivo da soja em função dos fertilizantes.....	36
FIGURA 16	Análise canônica para o cultivo do milho em função dos fertilizantes.....	37
FIGURA 17	Análise canônica para o cultivo da braquiária em função dos fertilizantes.	39
FIGURA 18	Análise canônica para os atributos químicos residuais no solo em função dos fertilizantes.....	40

## RESUMO

RAMOS, M de M., UniRV – Universidade de Rio Verde, dezembro de 2025. **Disponibilidade de fósforo em cultivo sequencial de soja, milho e braquiária utilizando estruvita.** Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. June Faria Scherrer Menezes. Coorientador: Prof. Dr. Ricardo de Castro Dias.

A agricultura é um dos principais impulsionadores do PIB brasileiro, com destaque para o sistema de produção típico do Cerrado, baseado na sucessão soja, milho safrinha e braquiária. A soja se destaca pelo elevado volume produzido e exportado, sendo estratégica para a produção de óleo, proteína, ração animal e biodiesel, o que a insere no contexto da segurança alimentar e energética global. O aumento da demanda por soja e milho decorre do crescimento populacional, de mudanças nos padrões alimentares e da expansão dos biocombustíveis. Entretanto, a sustentabilidade desse sistema produtivo é ameaçada pela dependência de fósforo (P), nutriente aplicado via fertilizantes, cujas reservas minerais são finitas. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi quantificar a disponibilidade do P, comparando fontes convencionais com a estruvita em plantio sequencial de soja, milho e braquiária, bem como, relacionar essas fontes às características agronômicas avaliadas em cada cultura. O solo utilizado foi LATOSSOLO VERMELHO de mata nativa do Cerrado. O experimento foi conduzido em casa de vegetação em ambiente controlado, em delineamento inteiramente casualizado, com 6 tratamentos de P, 4 doses (50, 100, 150 e 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e um controle sem P, em 4 repetições, totalizando 100 vasos de PVC com 2,5 kg de solo cada. Os tratamentos foram: estruvita em pó; estruvita granulada; fertilizante organomineral granulado à base de estruvita (50/50); fosfato de cálcio; MAP e superfosfato simples. As características avaliadas foram altura de plantas, massa seca da parte aérea, teores e acúmulo de nutrientes na parte aérea de cada cultura e residual de P no solo após os três cultivos. Na soja, em primeiro cultivo, as fontes de estruvita, tanto em pó ou granulada, favoreceram o crescimento das plantas, refletindo em maior altura, maior índice de clorofila e adequada produção de MSPA, indicando eficiência no suprimento de P. Ainda que o MAP tenha proporcionado, de forma geral, os melhores resultados, em todas as variáveis e cultivos, a estruvita apresentou desempenho semelhante em vários parâmetros, com destaque para o índice de clorofila, evidenciando seu potencial como fonte alternativa de fósforo. O fosfato de cálcio, por sua vez, mostrou-se menos eficiente na fase inicial, não conseguindo disponibilizar todo o P demandado pela soja aos 45 dias, o que reforça as limitações de fontes menos solúveis para culturas de ciclo mais curto quando avaliadas em estádios iniciais. No milho, em segundo cultivo, a estruvita organomineral demonstrou elevada eficácia nas variáveis avaliadas, sugerindo que a combinação da estruvita com a matriz orgânica contribuiu para reduzir a adsorção de P aos colóides do solo e prolongar sua disponibilidade. No terceiro cultivo, com braquiária, aos 135 dias após aplicação dos fertilizantes, observou-se um cenário distinto, em que o fosfato de cálcio e o superfosfato simples foram as fontes que proporcionaram os melhores resultados. Esse desempenho tardio do fosfato de cálcio indicou que, embora menos eficiente para atender demandas imediatas de culturas anuais de ciclo curto, sua liberação mais lenta pode favorecer cultivos subsequentes ou de maior duração, contribuindo para o fornecimento residual de P ao sistema. Concluiu-se que, a estruvita, sobretudo em formulações granuladas e organominerais, constitui alternativa viável para substituir parcialmente fontes minerais convencionais, no sistema de produção do Cerrado brasileiro, conciliando desempenho agronômico em soja, milho e braquiária, com benefícios ambientais associados, ao uso de uma fonte renovável de fósforo e de economia circular.

**Palavras -chave:** Aproveitamento de resíduos, Fonte renovável de fósforo, Sustentabilidade.

## ABSTRACT

RAMOS, M de M., UniRV – Universidade de Rio Verde, December 2025. **Phosphorus availability in sequential cultivation of soybeans, corn, and *Urochloa* grass using struvite.** Advisor: Prof. June Faria Scherrer Menezes, PhD. Co-advisor: Prof. Ricardo de Castro Dias, PhD.

Agriculture is one of the main drivers of Brazil's GDP, especially the typical Cerrado production system, based on the succession of soybeans, second-crop corn, and brachiaria grass. Soybeans stand out for their high production and export volumes, being strategic for the production of oil, protein, animal feed, and biodiesel, which places them within the context of global food and energy security. The increased demand for soybeans and corn stems from population growth, changes in dietary patterns, and the expansion of biofuels. However, the sustainability of this production system is threatened by its dependence on phosphorus (P), a nutrient applied via fertilizers, whose mineral reserves are finite. In this context, the objective of this work was to quantify the availability of P, comparing conventional sources with struvite in sequential planting of soybeans, corn, and brachiaria grass, as well as to relate these sources to the agronomic characteristics evaluated in each crop. The soil used was a RED LATOSOL from native Cerrado forest. The experiment was conducted in a greenhouse under controlled conditions, in a completely randomized design, with 6 P treatments, 4 doses (50, 100, 150 and 200 kg ha<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) and a control without P, in 4 replicates, totaling 100 PVC pots with 2.5 kg of soil each. The treatments were: powdered struvite; granulated struvite; granulated organomineral fertilizer based on struvite (50/50); calcium phosphate; MAP and single superphosphate. The characteristics evaluated were plant height, shoot dry mass, nutrient content and accumulation in the shoot of each crop, and residual P in the soil after the three cultivations. In first-crop soybeans, struvite sources, both powdered and granulated, favored plant growth, resulting in greater height, higher chlorophyll index, and adequate dry matter production, indicating efficiency in phosphorus supply. Although MAP generally provided the best results across all variables and crops, struvite showed similar performance in several parameters, particularly the chlorophyll index, highlighting its potential as an alternative phosphorus source. Calcium phosphate, on the other hand, proved less efficient in the initial phase, failing to provide all the phosphorus demanded by soybeans at 45 days, reinforcing the limitations of less soluble sources for shorter-cycle crops when evaluated in early stages. In second-crop corn, organomineral struvite demonstrated high efficacy in the evaluated variables, suggesting that the combination of struvite with the organic matrix contributed to reducing phosphorus adsorption to soil colloids and prolonging its availability. In the third crop, with brachiaria grass, 135 days after fertilizer application, a different scenario was observed, in which calcium phosphate and single superphosphate were the sources that provided the best results. This late performance of calcium phosphate indicated that, although less efficient in meeting the immediate demands of short-cycle annual crops, its slower release may favor subsequent or longer-duration crops, contributing to the residual supply of P to the system. It was concluded that struvite, especially in granulated and organomineral formulations, constitutes a viable alternative to partially replace conventional mineral sources in the Brazilian Cerrado production system, reconciling agronomic performance in soybeans, corn, and brachiaria grass with associated environmental benefits, using a renewable source of phosphorus and promoting a circular economy.

**Keywords:** Waste utilization, Renewable source of phosphorus, Sustainability.

# 1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um elemento essencial ao crescimento e desenvolvimento vegetal, desempenhando papel central em processos metabólicos como: fotossíntese, respiração e síntese de compostos energéticos e estruturais. Em solos tropicais altamente intemperizados, a disponibilidade de P é limitada, em função da intensa fixação em óxidos de ferro e alumínio, o que reduz a eficiência dos fertilizantes fosfatados solúveis tradicionalmente utilizados. Paralelamente, o P é um recurso não renovável, obtido a partir de reservas minerais finitas, cuja exploração crescente tem implicações diretas sobre a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e a segurança alimentar em escala global.

No contexto brasileiro, caracterizado por ampla ocorrência de solos com baixa disponibilidade natural de P e elevada dependência de fertilizantes importados, a identificação e avaliação de fontes alternativas de fósforo tornam-se estratégicas. A estruvita ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ), destaca-se como uma fonte de P de liberação lenta, com potencial para aumentar a eficiência de uso do nutriente e mitigar impactos ambientais. Além da forma em pó e granulada, o desenvolvimento de fertilizantes organominerais à base de estruvita, combinando nutrientes minerais e matéria orgânica, pode promover melhorias adicionais nas propriedades químicas e biológicas do solo, com possíveis efeitos positivos de médio e longo prazo.

Em sistemas de produção intensivos, os cultivos sucessivos de soja, milho safrinha e braquiária exercem papel central na produção de grãos e na integração lavoura-pecuária. Esses sistemas se caracterizam por elevada demanda nutricional, elevada exportação de P via colheita e necessidade de estratégias de manejo que conciliem alta produtividade com sustentabilidade. A avaliação de fontes alternativas de fósforo, como estruvita em comparação aos fosfatos convencionais, em cultivos sucessivos de soja, milho e braquiária, é fundamental para compreender sua eficiência agrônômica, seus efeitos residuais no solo e seu potencial de uso em larga escala. Assim, objetivo deste trabalho foi avaliar a eficácia das forma de estruvita como fonte alternativa de fósforo para sistemas agrícolas com cultivos sucessivos de soja, milho safrinha e braquiária, em comparação com fertilizantes fosfatados convencionais, em solos tropicais do cerrado.

A incorporação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) ao presente trabalho é central, pois a avaliação da estruvita como fonte alternativa de fósforo, em sistemas sucessivos de soja, milho e braquiária abordou simultaneamente a segurança alimentar e a agricultura sustentável (ODS 2), ao buscar maior eficiência no uso de um nutriente essencial e

finito; a proteção dos recursos hídricos (ODS 6), potencialmente reduzir perdas de P e riscos de eutrofização; o consumo e a produção responsáveis (ODS 12), ao promover a reciclagem de fósforo, por meio da recuperação de nutrientes de resíduos; e a ação contra a mudança do clima (ODS 13), ao diminuir a dependência de fertilizantes fosfatados importados e de origem mineral, contribuindo para sistemas agrícolas mais resilientes, circulares e ambientalmente sustentáveis, no contexto do Cerrado brasileiro.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Cultura da Soja**

A soja (*Glycine max* L.) é atualmente o grão mais relevante para o agronegócio brasileiro, desempenhando um papel central na economia agrícola do país. Tradicionalmente cultivada durante o verão, devido as suas características fisiológicas e exigências climáticas, a cultura tem consolidado o seu espaço como a principal cultura agrícola do Brasil, ocupando vastas áreas e contribuindo significativamente para o crescimento econômico do setor (Domingues, 2016).

Na década de 1970, a soja começou a evidenciar sua importância como o principal grão oleaginoso, no cenário mundial, já se destacando como a cultura mais relevante para o agronegócio brasileiro. Durante esse período, houve um crescimento exponencial na produção de soja, inicialmente concentrada na região sul do país. Na década de 1980, o cultivo se expandiu para a região central do Brasil, com a área cultivada aumentando de 1,3 milhões de hectares para 8,8 milhões (Embrapa, 2014). Esse crescimento expressivo não foi apenas resultado do bom retorno econômico proporcionado pela soja, mas também, pela sua ampla utilização na indústria alimentícia, como uma fonte fundamental de proteína tanto para o consumo humano ou animal, além de sua aplicação na indústria química para a produção de biocombustíveis (Embrapa, 2014).

Na safra de 2024/2025, o Brasil se consolidou como o maior produtor mundial de soja, com uma produção de 171,5 milhões de toneladas, representando um crescimento de 13,3% em relação à safra anterior. O desempenho expressivo posicionou o país como um dos principais exportadores de soja no mundo, com a China mantendo-se como o principal destino das exportações (CONAB, 2025). A busca por manter e aumentar altas produtividades exige dos

produtores investimentos significativos em tecnologias de manejo (Embrapa, 2023). No entanto, para que o cultivo da soja seja eficiente como um sistema de produção, é crucial identificar e superar suas limitações básicas e primárias, como o *yield gap* (lacuna de produtividade) causado por fatores edafoclimáticos e de gestão (Battisti *et al.*, 2023).

A importância do P para o desenvolvimento das plantas, especialmente em culturas como a soja, não pode ser subestimada. O P é um elemento que desempenha um papel fundamental, em processos metabólicos chave, incluindo a fotossíntese, a respiração, a síntese de ácidos nucleicos e a transferência de energia (Conceição *et al.*, 2016). No caso da soja, a disponibilidade adequada de P no solo é crucial para garantir um desenvolvimento radicular robusto, o que permite uma maior absorção de água e nutrientes, resultando em uma maior produtividade da cultura (Moreira *et al.*, 2024). Entretanto, a fixação de P no solo, especialmente em solos tropicais ácidos, pode limitar sua disponibilidade para as plantas, exigindo a aplicação de fertilizantes fosfatados para atender às demandas nutricionais da cultura (Lima *et al.*, 2019).

## **2.2 Cultura do Milho**

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas mais importantes do mundo, sendo essencial tanto para a alimentação humana ou animal, além de ser uma matéria-prima fundamental para diversas indústrias, incluindo a produção de biocombustíveis, amido e outros produtos derivados. No Brasil, o milho ocupa uma posição de destaque no cenário agrícola, sendo cultivado em diversas regiões do país, com uma produção que supera 139 milhões de toneladas por ano (CONAB, 2025).

A história do cultivo de milho no Brasil remonta à época pré-colombiana, quando os povos indígenas já utilizavam o grão como base de sua alimentação. Com a colonização e a expansão agrícola, o milho se tornou uma das principais culturas do país, crescendo em importância ao longo dos séculos. Na atualidade, o milho é amplamente cultivado em sistemas de produção intensivos, em que a alta produtividade é um objetivo constante dos produtores (Embrapa, 2018).

Assim como a soja, o milho é altamente dependente da disponibilidade de P no solo para atingir seu máximo potencial produtivo. O P é fundamental para o desenvolvimento inicial das plantas de milho, influenciando diretamente a formação de raízes e a eficiência na absorção de água e nutrientes. Além disso, P está envolvido em processos críticos como a fotossíntese, a

formação de ATP (adenosina trifosfato) e a síntese de ácidos nucleicos, que são essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Quoos, 2018).

Em solos tropicais, em que a fixação de P é uma preocupação devido à alta acidez e à presença de óxidos de ferro e alumínio, a aplicação de fertilizantes fosfatados é uma prática comum para garantir que as plantas de milho tenham acesso aos níveis adequados desse nutriente (Lima *et al.*, 2019). A eficiência da adubação fosfatada, no entanto, depende de diversos fatores, incluindo o tipo de solo, o pH, a umidade e a interação com outros nutrientes. Estudos têm mostrado que a adubação fosfatada, quando realizada de maneira eficiente, pode aumentar significativamente a produtividade do milho, tornando-se uma ferramenta indispensável para o sucesso da cultura (Azevedo *et al.*, 2022).

### **2.3 Cultura da braquiária**

A *Urochloa* spp., popularmente conhecida como capim-braquiária, mantém-se como a forrageira mais utilizada no Brasil, ocupando cerca de 85% das áreas de pastagens cultivadas e constituindo a base da alimentação na pecuária de corte, setor que movimenta bilhões na economia nacional. Originária da África e introduzida no país para revolucionar o manejo de pastagens, a *Urochloa* consolidou-se devido a sua alta rusticidade, ampla adaptabilidade a solos ácidos e variadas condições climáticas, além de seu papel essencial na cobertura do solo e na sustentabilidade dos sistemas produtivos (Embrapa, 2025).

A *Urochloa* é conhecida por sua resistência a solos pobres e ácidos, características comuns em muitas regiões tropicais do Brasil. No entanto, mesmo essa gramínea resistente pode se beneficiar significativamente da aplicação de P, nutriente frequentemente limitante em solos tropicais (Caramaschi, 2015). O P é crucial para o estabelecimento inicial da *Urochloa*, promovendo o desenvolvimento de um sistema radicular profundo e eficiente, o que permite à planta explorar melhor os nutrientes e a água disponíveis no solo (Silva, 2023).

Além disso, o P está diretamente relacionado à capacidade da *Urochloa* de fixar carbono no solo, um processo que contribui para a mitigação das mudanças climáticas ao sequestrar carbono atmosférico e aumentar o teor de matéria orgânica no solo (Silva, 2023). A eficiência da *Urochloa* em reciclar nutrientes e melhorar a fertilidade do solo a torna uma aliada valiosa não apenas para a pecuária, mas também para a agricultura sustentável, onde o manejo integrado de culturas e pastagens pode resultar em sistemas de produção mais resilientes e produtivos (Vargas *et al.*, 2023).

Em termos de manejo, a adubação fosfatada em pastagens de braquiária deve ser cuidadosamente planejada para evitar desperdícios e garantir que o P aplicado seja efetivamente utilizado pelas plantas. Pesquisas indicam que a aplicação de P em pastagens pode aumentar a produtividade forrageira, o que, por sua vez, resulta em uma maior capacidade de suporte de animais e, conseqüentemente, em uma maior produção de carne por hectare (Dutra, 2018).

## **2.4 Importância do fósforo para as plantas**

O fósforo (P) é um dos 17 elementos essenciais para as plantas, sendo classificado como um macronutriente devido a sua necessidade em grandes quantidades para o crescimento e desenvolvimento vegetal (Faria, 2025). Ele desempenha um papel crucial em diversos processos bioquímicos, como: a fotossíntese, a respiração, a transferência de energia e a síntese de ácidos nucleicos, proteínas e lipídios (Wahab *et al.*, 2024). Além disso, o P é fundamental para o desenvolvimento radicular, influenciando diretamente a capacidade das plantas de remodelar sua arquitetura de raízes para explorar o solo em busca de água e nutrientes (Choi; Lee; Chan, 2025).

Em solos tropicais, a disponibilidade de P é frequentemente limitada devido à fixação do nutriente por óxidos de ferro e alumínio, o que reduz sua biodisponibilidade para as plantas. Essa limitação é particularmente preocupante em culturas de alta demanda, como soja, milho e brachiaria, em que o P é essencial para as culturas alcançarem altas produtividades (Barros, 2020). Para superar essa barreira, aplicação de fertilizantes fosfatados é uma prática comum e necessária, especialmente em sistemas de produção intensivos.

Entretanto, a eficiência da adubação fosfatada pode ser influenciada por vários fatores, incluindo: o tipo de solo, o pH, a umidade e a interação com outros nutrientes. Por isso, o manejo adequado da adubação fosfatada é crucial para garantir que as plantas recebam a quantidade necessária de P, sem causar impactos negativos ao meio ambiente, como a eutrofização de corpos d'água devido ao excesso de P lixiviado (Batista *et al.*, 2018).

O manejo sustentável do P é, portanto, uma questão de grande importância para a agricultura moderna. Além de garantir a produtividade das culturas, o uso eficiente do P contribui para a conservação dos recursos naturais e a mitigação das mudanças climáticas, ao promover práticas agrícolas que melhoram a saúde do solo e reduzem as emissões de gases de efeito estufa (Afonso *et al.*, 2014).

## 2.5 Impactos ambientais dos dejetos suínos

Os dejetos suínos são reconhecidos por suas altas concentrações de nutrientes, com destaque para o nitrogênio (N) e o fósforo (P) (Hollas, 2022). No entanto, o gerenciamento desses subprodutos exige cautela e alinhamento com a legislação vigente, especificamente a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A lei preconiza a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem e o tratamento dos resíduos sólidos, bem como, a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Brasil, 2010).

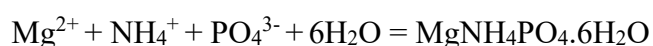
Quando não manejados adequadamente, os nutrientes presentes nos dejetos podem contaminar águas superficiais e subterrâneas, provocando a eutrofização de corpos hídricos. Adicionalmente, a emissão de gases como a amônia e outros gases de efeito estufa agrava a poluição atmosférica e contribui para as mudanças climáticas (Embrapa, 2019). A gestão tradicional, frequentemente baseada na aplicação direta no solo, enfrenta desafios significativos: a saturação do solo pode ocasionar o escoamento superficial (*runoff*) para cursos d'água, comprometendo a saúde dos ecossistemas aquáticos (Afonso et al., 2014), enquanto a aplicação incorreta potencializa a emissão de gases prejudiciais (Corioletti *et al.*, 2019).

Nesse cenário, a reciclagem de nutrientes, especialmente do fósforo advindo da suinocultura, emerge como uma estratégia fundamental para reduzir a dependência de fontes minerais não renováveis e mitigar impactos ambientais (Hollas, 2022). Uma das alternativas mais promissoras é a produção de estruvita (fosfato de amônio e magnésio), um composto que pode ser extraído dos dejetos e utilizado como fertilizante de lenta liberação nas práticas agrícolas (Barrichelo *et al.*, 2015).

Diversos estudos discutem métodos eficazes para a extração de estruvita, focando em inovações que aliam eficiência técnica à sustentabilidade (García-González; Martínez-Toledo, 2021). A viabilidade técnica da recuperação de fósforo via estruvita depende diretamente da compreensão dos mecanismos físico-químicos e biológicos envolvidos. A seguir, detalham-se as especificidades de cada abordagem (Santos, 2011):

### 1. Precipitação Química e Estequiometria

A precipitação química é o método mais consolidado e baseia-se na cristalização espontânea do mineral, quando as concentrações iônicas excedem o produto de solubilidade da estruvita. A reação fundamental ocorre na proporção equimolar de 1:1:1 de magnésio ( $Mg^{2+}$ ), amônio ( $NH_4^+$ ) e fosfato ( $PO_4^{3-}$ ), conforme a equação simplificada:



Para que essa reação ocorra com eficiência (Santos, 2011), o controle do pH é o parâmetro crítico, devendo situar-se preferencialmente entre 8,0 e 10,0. Em efluentes de suinocultura, em que o magnésio costuma ser o nutriente limitante em relação ao nitrogênio e fósforo, a adição externa de fontes de Mg (como  $MgCl_2$  ou  $MgO$ ) é frequentemente necessária, o que pode elevar os custos operacionais. Além disso, a presença de íons competidores, como o cálcio ( $Ca^{2+}$ ), pode inibir a formação da estruvita pura, exigindo pré-tratamentos para garantir a qualidade do fertilizante final.

## 2. Processos Biológicos e Biomineralização

Como alternativa ao alto custo dos reagentes químicos, os processos biológicos exploram o metabolismo microbiano para induzir a precipitação. Pesquisas indicam que certas bactérias têm a capacidade de alcalinizar o meio, elevando o pH sem a adição de soda cáustica ou cal e de liberar íons fosfatos no ambiente (Oliveira Melgaço *et al.*, 2020).

Um mecanismo comum é a utilização de bactérias produtoras de urease, que hidrolisam a ureia presente nos dejetos, gerando amônia e bicarbonato, aumentando assim o pH e favorecendo a supersaturação necessária para a formação dos cristais. Essa rota, conhecida como biomineralização, apresenta potencial para reduzir significativamente a pegada de carbono do tratamento, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade.

## 3. Intensificação por Tecnologias de Membrana

Para superar a baixa concentração de nutrientes em efluentes diluídos, tecnologias de membrana, como a eletrodialise e a osmose direta, são empregadas como etapas preparatórias. Esses sistemas funcionam concentrando seletivamente os íons  $PO_4^{3-}$  e  $NH_4^+$ , criando um licor concentrado que facilita a precipitação subsequente e aumenta a taxa de recuperação do produto (Vicente, 2021). Embora exijam maior investimento inicial em infraestrutura, essas tecnologias permitem obter uma estruvita de maior pureza e menor contaminação por patógenos ou metais pesados.

Esses processos não apenas recuperam recursos valiosos, mas também oferecem uma alternativa viável aos fertilizantes químicos convencionais, principalmente quanto ao P, promovendo a economia circular conforme incentivado pela PNRS (Vicente, 2021).

## 2.6 Aplicações da estruvita na agricultura

A estruvita ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ) tem se destacado como uma fonte alternativa promissora aos fertilizantes fosfatados convencionais, principalmente por sua liberação lenta e pelo caráter sustentável de sua produção, que normalmente envolve a recuperação de fósforo a

partir de efluentes agroindustriais e resíduos de suinocultura. Sua utilização na agricultura busca não apenas suprir a demanda das plantas por fósforo (P), mas reduzir a dependência de fontes minerais finitas e de alto custo de extração (Menezes *et al.*, 2018).

Um dos principais diferenciais da estruvita é sua baixa solubilidade em água, o que favorece a liberação gradual de nutrientes no solo, especialmente fósforo, magnésio e nitrogênio amoniacal. Esse processo diminui perdas por lixiviação e adsorção em solos tropicais altamente intemperizados, que apresentam elevada fixação de fósforo (De-Bashan; Bashan, 2004). Estudos mostram que a aplicação de estruvita pode melhorar a eficiência de uso de fósforo pelas plantas, garantindo suprimento ao longo do ciclo e reduzindo a necessidade de reaplicações frequentes (Kunz *et al.*, 2020).

Diversas culturas têm respondido positivamente à aplicação de estruvita. Na soja, verificou-se incremento no desenvolvimento radicular e maior acúmulo de matéria seca em solos com baixa disponibilidade de P, devido à liberação gradual do nutriente e sua sinergia com microrganismos solubilizadores (Hermann *et al.*, 2019). Em milho, experimentos conduzidos em solos argilosos mostraram produtividades comparáveis às obtidas com superfosfato triplo, com a vantagem da estruvita apresentar efeito residual superior em cultivos subsequentes (Roy *et al.*, 2016). Já em sistemas de integração lavoura-pecuária, o uso da estruvita contribuiu para a manutenção da fertilidade do solo e para o melhor estabelecimento de forrageiras, como a braquiária, garantindo ciclagem de nutrientes no sistema produtivo (Oliveira *et al.*, 2021).

Outro aspecto relevante é a contribuição da estruvita para a agricultura sustentável, uma vez que seu uso reduz a pressão sobre jazidas de fosfato natural e possibilita o reaproveitamento de nutrientes presentes em resíduos. Essa prática alinha-se às metas globais de economia circular e de redução da poluição hídrica causada pelo excesso de fósforo em efluentes (Shu *et al.*, 2006).

Portanto, a estruvita se apresenta não apenas como uma fonte eficiente de fósforo, mas também, como uma estratégia inovadora para conciliar produtividade agrícola e sustentabilidade ambiental, sendo especialmente relevante para solos tropicais com alta capacidade de fixação de fósforo e para sistemas que demandam efeito residual prolongado do fertilizante.

## 2.7 Comparação com fertilizantes tradicionais: vantagens e desvantagens

A utilização da estruvita na agricultura deve ser analisada em comparação com os fertilizantes fosfatados convencionais, como o superfosfato simples (SSP), o superfosfato triplo (TSP) e o fosfato monoamônico (MAP). Esses insumos são amplamente utilizados no Brasil e no mundo devido a sua elevada solubilidade em água e à rápida disponibilização de fósforo (P) para as plantas (Prochnow; Casarin; Stipp, 2010). Entretanto, essa elevada solubilidade favorece perdas por fixação em solos tropicais altamente intemperizados, como os Latossolos, além de aumentar o risco de eutrofização de ecossistemas aquáticos (Withers *et al.*, 2015).

Nesse contexto, a estruvita apresenta um comportamento distinto em termos de liberação de nutrientes, o que resulta em vantagens e desvantagens, em relação aos fertilizantes fosfatados tradicionais.

A principal vantagem da estruvita é o caráter de liberação lenta e gradual do P. Ao contrário das fontes altamente solúveis, como MAP e TSP, a estruvita libera P de forma contínua, o que garante suprimento ao longo do ciclo da cultura e maior eficiência de uso do nutriente (Kunz *et al.*, 2020). Esse padrão de liberação associa-se a um efeito residual prolongado no solo, podendo beneficiar cultivos subsequentes e reduzir a necessidade de adubações frequentes (Roy *et al.*, 2016). Além disso, a estruvita apresenta composição mais equilibrada, fornecendo não apenas P, mas também magnésio (Mg) e nitrogênio na forma amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), ambos essenciais ao metabolismo vegetal (Hermann *et al.*, 2019). E, do ponto de vista ambiental, a estruvita contribui para a sustentabilidade dos sistemas produtivos, uma vez que é obtida a partir da recuperação de nutrientes presentes em resíduos agroindustriais e efluentes, reduzindo a dependência de jazidas de rochas fosfáticas não renováveis (Shu *et al.*, 2006).

Entre as limitações da estruvita, destaca-se a baixa solubilidade imediata. Em solos com baixa disponibilidade inicial de P, a liberação lenta pode restringir o crescimento inicial das plantas, o que torna necessária, em alguns casos, a combinação com fontes fosfatadas mais solúveis em estádios críticos do desenvolvimento das culturas (De-Bastiani *et al.*, 2021). Outro entrave é a disponibilidade limitada do produto. A produção de estruvita depende da adoção de sistemas de recuperação de nutrientes em estações de tratamento de efluentes ou unidades agroindustriais, o que torna sua oferta ainda restrita e, em geral, localizada (Menezes *et al.*, 2018).

A variabilidade na composição também é um aspecto relevante: em função do tipo de resíduo utilizado (esgoto doméstico, dejetos de suínos, efluentes industriais, entre outros),

podem ocorrer variações na pureza do material e nas proporções de P, Mg e N, o que exige controle de qualidade rigoroso (Liu *et al.*, 2013). Adicionalmente, os custos de implantação e operação das tecnologias de precipitação e cristalização necessárias à produção de estruvita ainda podem ser elevados, o que constitui barreira econômica à sua adoção em larga escala (Shu *et al.*, 2006).

Diante do exposto, a estruvita não deve ser encarada como substituta direta dos fertilizantes fosfatados convencionais, mas como um insumo complementar em sistemas agrícolas, com maior potencial em cultivos de médio e longo prazo e em esquemas de rotação de culturas. Estratégias de manejo que combinem fontes de rápida solubilidade (como MAP ou TSP) com estruvita podem proporcionar melhor equilíbrio entre a disponibilidade imediata e residual de nutrientes, contribuindo simultaneamente para altas produtividades e maior sustentabilidade dos sistemas de produção.

## **2.8 Impactos ambientais e benefícios econômicos: reciclagem de nutrientes, ODS e sustentabilidade**

O uso da estruvita como fertilizante de segunda geração transcende o mero fornecimento de nutrientes às plantas. Trata-se de uma tecnologia-chave em modelos de economia circular, na qual resíduos agropecuários e urbanos deixam de representar passivos ambientais e passam a constituir insumos de alto valor agregado para a agricultura. Essa abordagem alinha-se diretamente às agendas globais de sustentabilidade e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles relacionados à segurança alimentar, à proteção dos recursos hídricos, ao consumo responsável e à ação climática.

### **2.8.1 Impactos ambientais**

A precipitação de estruvita a partir de dejetos de suínos, águas residuárias e lodos de estações de tratamento de esgoto permite a remoção controlada de fósforo (P) e nitrogênio (N) de matrizes potencialmente poluidoras, reduzindo de forma significativa o risco de poluição difusa e a eutrofização de corpos hídricos (Karimi; Hamzeh; Karimi, 2021). Ao evitar a descarga direta desses nutrientes em ecossistemas aquáticos, diminui-se a ocorrência de florações algais, zonas mortas e perdas de biodiversidade aquática, aspectos centrais para o cumprimento do ODS 6 (água potável e saneamento).

Adicionalmente, o tratamento e a valorização de resíduos orgânicos, por meio da recuperação de nutrientes contribuem, para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa associados à decomposição anaeróbia desses materiais, ao mesmo tempo em que reduzem o risco de contaminação do lençol freático por nitrato (Hermann *et al.*, 2019).

Outro impacto ambiental relevante reside na diminuição da dependência da mineração de rochas fosfáticas. A extração intensiva desse recurso não renovável está associada à degradação de ecossistemas, ao consumo de energia e à geração de resíduos, além de ocorrer sobre reservas limitadas e geograficamente concentradas (Cordero *et al.*, 2019). Ao recuperar P de resíduos, a estruvita contribui diretamente para a conservação de recursos naturais finitos e para padrões de produção mais sustentáveis, em consonância com o ODS 12 (consumo e produção responsáveis) e o ODS 13 (ação contra a mudança do clima).

### **2.8.2 Benefícios econômicos**

Sob a ótica econômica, a estruvita gera uma série de benefícios diretos e indiretos em diferentes elos da cadeia produtiva. Em primeiro lugar, sua característica de liberação lenta de fósforo reduz a necessidade de reaplicações frequentes, elevando a eficiência de uso do nutriente e possibilitando a redução de custos de adubação a médio e longo prazo (Kunz; Perdomo; Bertocini, 2020).

Em segundo lugar, a valorização de resíduos agropecuários e urbanos transforma dejetos e efluentes em insumos comercializáveis, reduzindo despesas com tratamento e destinação de resíduos e criando novas fontes de renda para produtores e operadores de estações de tratamento (Menezes *et al.*, 2018).

No plano macroeconômico, a produção de estruvita contribui para a segurança alimentar e nutricional, ao atenuar a dependência de fertilizantes fosfatados importados e fortalecer a soberania agrícola de países fortemente dependentes do mercado externo, como o Brasil (Roy *et al.*, 2016). Essa maior autonomia insere-se no escopo do ODS 2 (fome zero e agricultura sustentável).

Além disso, a incorporação de tecnologias de reciclagem de nutrientes em cadeias agroindustriais alinha-se a critérios de ESG (Environmental, Social and Governance), ampliando o potencial de acesso a linhas de crédito verde, incentivos fiscais e mercados diferenciados, que valorizam produtos com menor pegada ambiental (De-Bastiani *et al.*, 2021). Desse modo, a estruvita configura um vetor de inovação e competitividade em direção a economias de baixo carbono.

### **2.8.3 Sustentabilidade e agricultura circular**

O aproveitamento da estruvita sintetiza o conceito de agricultura circular, em que os fluxos de nutrientes são fechados por meio da coleta, recuperação e reinserção de P, N e Mg nos sistemas produtivos, reduzindo perdas e impactos ambientais ao longo do ciclo. Esse modelo contribui de forma integrada para diversos ODS, com destaque para: ODS 2 (fome zero e agricultura sustentável), pela melhoria da eficiência no uso de nutrientes e da resiliência dos sistemas agrícolas; ODS 6 (água potável e saneamento), pela mitigação da poluição hídrica; ODS 12 (consumo e produção responsáveis), pelo reaproveitamento de resíduos; e ODS 13 (ação contra a mudança do clima), pela redução de emissões associadas à decomposição de resíduos e à extração de recursos não renováveis (ONU, 2015).

Portanto, a adoção da estruvita como fertilizante de segunda geração não apenas incrementa a fertilidade do solo e a produtividade agrícola, mas integra uma estratégia robusta de mitigação ambiental e de fortalecimento econômico em uma perspectiva de longo prazo. Nesse contexto, a estruvita se consolida como solução tecnológica inovadora e alinhada às agendas globais de sustentabilidade, oferecendo respostas concretas aos desafios impostos pelo esgotamento das fontes minerais convencionais e pela necessidade de transição para sistemas agroalimentares mais resilientes, circulares e de baixo impacto ambiental, no século XXI.

## **3 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 Área experimental**

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em condições controladas, na Universidade de Rio Verde, no município de Rio Verde, GO, localizado a 17°47'02,8" S e 50°57'47,3" W, com altitude média de 768 m (Google Earth, 2022), durante o período de março de 2024 até julho de 2024. O solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distróférrico (Santos *et al.*, 2025), de textura argilosa, sob relevo plano a suave ondulado (declividade média de 3%). O solo é de mata nativa, sem histórico prévio de manejo.

Amostra do solo foi coletado na camada de 0,00–0,20 m, horizonte A, com auxílio de uma enxada. Após coleta, o solo foi seco, homogeneizado e peneirado em malha de 2 mm. Em seguida, foi realizada amostragem do solo para análise química inicial do solo a fim de

caracterização da fertilidade e determinação da necessidade de correção de acidez Tabela 1). O pH foi corrigido conforme recomendação obtida a partir dessa análise, utilizando-se calcário dolomítico filler com PRNT 93%, permanecendo o solo incubado, por 30 dias antes da instalação do experimento, para que o índice de saturação por bases chegasse a 70%.

TABELA 1 - Atributos químicos iniciais do solo na camada de 0,00–0,20 m

pH	Ca	Mg	K	Al
H <sub>2</sub> O		----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----		
5,	1,0	1,3	0,23	0,30
T	P Mel	argila	silte	areia
cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	----- g kg <sup>-1</sup> -----		
9,0	1,4	420	78	522

pH: potencial hidrogeniônico; Ca: cálcio; Mg: magnésio; K: potássio; Al: alumínio.

### 3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial (6 × 4) + 1, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram no fator A com seis fontes de fósforo (P): T1: Estruvita em pó; T2: Estruvita granulada; T3: Fertilizante organomineral granulado à base de estruvita (50% P estruvita / 50% P fonte mineral); T4: Fosfato de cálcio; T5: Fosfato monoamônico (MAP); T6: Superfosfato simples (SSP), e fator B, quatro doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (50, 100, 150 e 200 mg kg<sup>-1</sup>) além de um tratamento adicional sem aplicação de P (testemunha absoluta), com quatro repetições, totalizando 100 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi composta, por um vaso com volume de 3 dm<sup>3</sup>, preenchido com 2,5 kg de solo corrigido. Os fertilizantes com as respectivas doses foram incorporados em todo o volume do vaso, antes da semeadura do primeiro cultivo (soja). Nos demais cultivos foram avaliados os residuais de cada tratamento.

As doses de P foram definidas com base em trabalhos de calibração para solos tropicais (Novais; Smyth, 1999; Resende *et al.*, 2006). As fontes de estruvita e o fosfato de cálcio foram fornecidas pela Embrapa Suínos e Aves (Concórdia, SC) e caracterizadas quanto aos teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e demais nutrientes pela Embrapa Solos (Rio de Janeiro, RJ) e Embrapa Agrobiologia (Seropédica, RJ). MAP e SSP foram caracterizados de acordo com laudos laboratoriais e especificações comerciais (Tabela 2).

TABELA 2 - Composição química das fontes de fósforo utilizadas

Nutrientes	EP	EG	EOM	FC	MAP	SS
	----- % -----					
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	29	43	17	9	52	21
N	5	8,5	3,5	0,57	11	0
Ca	0	0	0	23	0	16
Mg	9	13	4,5	11,5	0	0

EP: estruvita em pó; EG: estruvita granulada; EO: estruvita organomineral; FC: fosfato de cálcio; MAP: fosfato monoamônico; SS: superfosfato simples.

### 3.3 Condução dos ensaios em cultivos sucessivos

Foram realizados três cultivos de forma sequencial: soja (primeiro cultivo), milho (segundo cultivo) e braquiária (terceiro cultivo) com duração de 45 dias cada. Para a instalação da cultura da soja (NEO 720IPRO) foram semeadas 6 sementes tratadas com fungicida e inseticida e inoculadas com *Bradyrhizobium* spp. Após a semeadura, todos os vasos receberam solução de nutrientes completa, isenta de P e N, para suprimento dos demais nutrientes, conforme recomendação adaptada de Dias *et al.* (2022). Durante toda a condução do experimento, a umidade do solo foi mantida de 70 a 100% da capacidade de campo, por meio de reposições diárias, com água destilada.

Aos dez dias após a semeadura da soja (10 DAS) foi realizado o desbaste, deixando-se duas plantas por vaso. A condução da cultura foi mantida por 45 dias após a semeadura. Foram realizadas as seguintes avaliações na soja: altura de plantas aos 15, 30 e 45 DAS; índice de clorofila aos 45 DAS, determinado no terceiro trifólio (folha mediana) com o aparelho SPAD 502 da Minolta; massa seca da parte aérea aos 45 DAS, teor e acúmulo de nutrientes na parte aérea, conforme metodologias descritas por Silva *et al.* (2015).

Após 45 dias de cultivo, as plantas de soja foram cortadas próximo ao nível do solo, com auxílio de tesoura, acondicionadas em sacos de papel e levadas à estufa de circulação de ar forçada a 65 °C para secagem, por 2 horas. Em seguida, o material seco foi pesado para obtenção da massa seca da parte aérea (MSPA), em balança analítica digital, com quatro casas decimais. A MSPA foi moída em moinho tipo Willey a 2 *mesh* para a determinação dos teores de nutrientes.

Após a colheita da parte aérea da soja, o solo permaneceu nos mesmos vasos, sem reposição de fósforo. Procedeu-se à semeadura do milho (9602-20VIP3), utilizando seis sementes por vaso. E aos 10 DAS foi realizado o desbaste, mantendo-se duas plantas por vaso.

O manejo hídrico e nutricional (solução nutritiva sem P) foi mantido de forma análoga ao primeiro cultivo, por 45 dias, utilizando-se solução de nutrientes, sem P (Dias et al., 2022).

As variáveis avaliadas no milho foram: altura de plantas aos 15, 30 e 45 DAS; índice de clorofila aos 45 DAS (folha mediana totalmente expandida); massa seca da parte aérea aos 45 DAS; teores e acúmulos de macronutrientes na MSPA. A colheita, secagem e preparo do material vegetal seguiram o mesmo procedimento adotado para a soja.

Concluído o cultivo do milho, o solo permaneceu nos vasos, novamente sem aplicação adicional de P, objetivando avaliar o efeito residual das fontes e doses. Foram semeadas 1 grama de sementes de braquiária (*Ruziziensis*) por vaso, com desbaste aos 10 DAS, mantendo-se duas plantas por vaso. O cultivo foi conduzido por 45 dias, sob as mesmas condições de irrigação e fornecimento de nutrientes (solução nutritiva isenta de P). As avaliações na braquiária foram: altura de plantas aos 15, 30 e 45 DAS; índice de clorofila aos 45 DAS; massa seca da parte aérea aos 45 DAS e teor e acúmulo de nutrientes na parte aérea aos 5 DAS. A colheita e processamento da biomassa seguiram o mesmo protocolo dos cultivos anteriores.

Ao final do terceiro cultivo, foram coletadas amostras de solo de cada vaso para determinação dos teores residuais de P e demais atributos químicos de interesse, utilizando metodologias recomendadas para solos tropicais (Silva *et al.*, 2015).

Todas as análises de solo e tecido vegetal foram realizadas nos Laboratórios Germinar LTDA, Multiusuários I da Universidade de Rio Verde e na Embrapa Solos.

### **3.4 Análises estatísticas**

#### ***Análise de variância (ANOVA)***

Os dados obtidos foram submetidos inicialmente à verificação dos pressupostos de normalidade dos resíduos e homogeneidade de variâncias. Atendidos esses pressupostos, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) para o esquema fatorial  $6 \times 4$ , com comparação adicional do tratamento controle, sem P. Quando identificada significância para o fator qualitativo (fontes de P) ou para a interação, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Para as variáveis que apresentaram resposta significativa às doses de  $P_2O_5$ , foram ajustados modelos de regressão, visando descrever o comportamento das culturas em função das doses e estimar doses de máxima eficiência técnica. A escolha dos modelos considerou a significância dos coeficientes, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e os critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC), permitindo uma avaliação refinada da dinâmica de

absorção de P e acúmulo de biomassa ao longo dos cultivos sucessivos de soja, milho e braquiária.

#### ***Análise de variância multivariada (MANOVA) e análise canônica***

Foi conduzida uma análise de variância multivariada (MANOVA) considerando como variáveis dependentes: altura de planta, teor de clorofila, massa seca da parte aérea (MSPA) e os teores acumulados de macro e micronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn). Como fatores fixos, foram considerados os efeitos de fonte e de dose de P, assim como a interação entre ambos. A significância dos efeitos foi avaliada pelo teste de Wilks (Lambda de Wilks), adotando-se nível de significância de 5%.

Posteriormente, realizou-se a Análise Discriminante Canônica (ADC) com o objetivo de identificar quais variáveis mais contribuíram para a discriminação entre os tratamentos e doses avaliados. Para isso, ajustou-se inicialmente um modelo linear multivariado considerando os mesmos fatores e variáveis resposta utilizados na MANOVA. A partir desse modelo, foram obtidas as funções canônicas discriminantes, permitindo a visualização da separação entre os grupos experimentais, em gráficos bidimensionais.

## **4.RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Anova Soja**

Em todas as variáveis, os fertilizantes fosfatados e as doses de P diferiram entre si, não havendo interação significativa entre fonte e dose (Tabela 5 - Anexos). Entretanto, a interação entre tratamento adicional (controle sem P) e a média dos tratamentos que compõem o fatorial foi significativa, indicando diferença entre o tratamento sem P e a média dos tratamentos em que havia a aplicação de P.

### **Anova Milho**

No segundo cultivo, com milho, os efeitos de fertilizante e de dose foram menos pronunciados, não havendo significância do efeito de fertilizante sobre as variáveis N ac., K ac., Mg ac. e S ac. e de dose sobre os acúmulos de Ca e K (Tabela 6 - Anexos). Para as demais variáveis foram observados efeitos significativos em relação a ambos os fatores. Não ocorreu interação significativa entre fertilizante e dose para nenhuma variável. Entretanto, a interação entre o tratamento adicional e os tratamentos que compõem o fatorial foi significativa para todas as variáveis resposta avaliadas.

## Anova Braquiária

Houve efeito significativo para os fatores isolados fontes de P (FP) e doses (D) para altura de plantas aos 45 dias, após a semeadura (AP45), índice de clorofila (IC) e massa seca da parte aérea (MSPA) das plantas de braquiária. As doses de P (D) não se diferenciaram significativamente em nenhuma das variáveis analisadas (Tabela 7 - Anexos).

### 4.1 Altura de plantas de soja, milho e braquiária

A altura das plantas de soja foi significativamente afetada pelas fontes de P aos 30 e 45 dias após a semeadura (DAS), com diferenças estatísticas entre os tratamentos ( $p < 0,0001$ ). Aos 45 DAS, as maiores alturas foram observadas nos tratamentos com EG (38,1 cm), EP (37,2 cm) e MAP (36,9 cm), enquanto fosfato de cálcio (SIS) e o controle apresentaram os menores valores. Esses resultados sugerem que fontes de P com maior solubilidade ou de liberação gradual promoveram melhor crescimento inicial da soja (Figura 1).

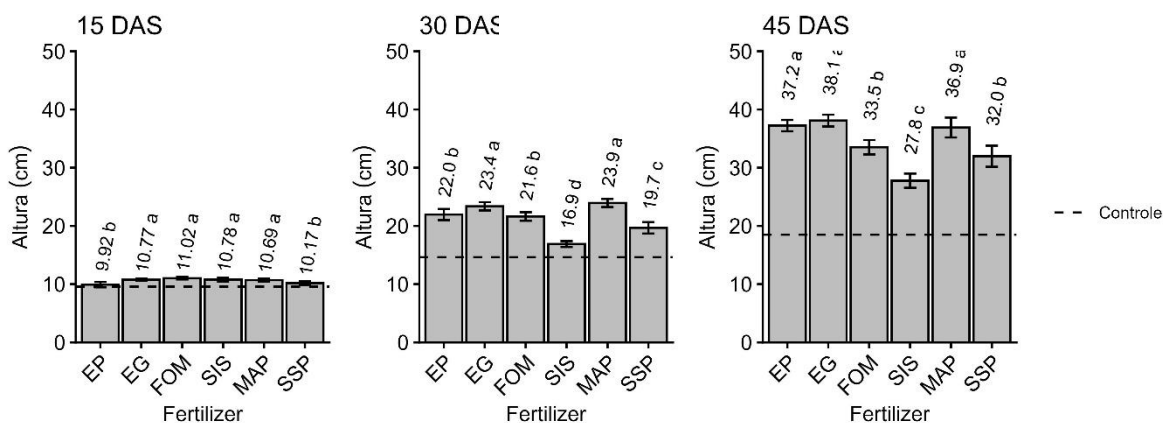


FIGURA 1 - Altura de plantas de soja em função das adubações aos 15, 30 e 45 dias após a aplicação dos fertilizantes.

### Altura de plantas (milho)

No segundo cultivo, com milho, não houve diferença significativa entre os fertilizantes ao se avaliar a altura de planta (Figura 2). Entretanto, a partir da segunda avaliação, aos 30 dias, foi evidente a menor altura de planta sem a aplicação de P (tratamento controle).

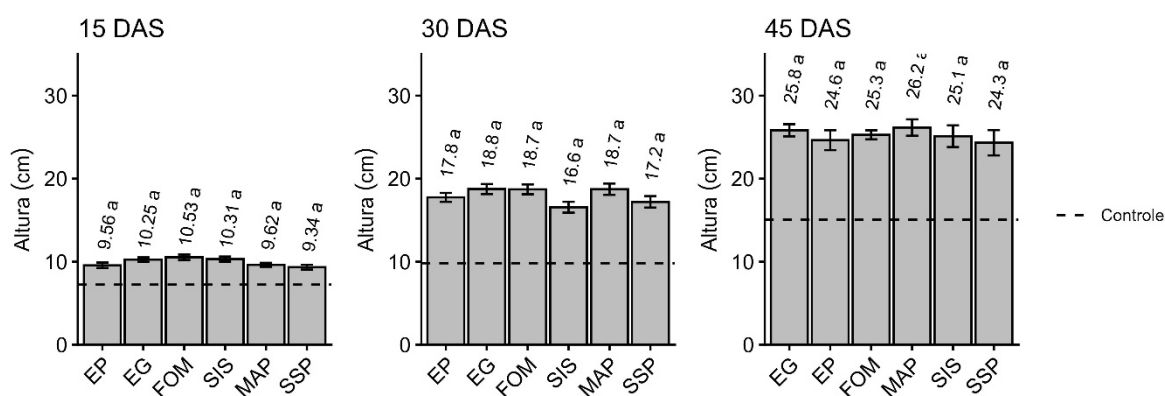


FIGURA 2 - Altura de plantas de milho em função das adubações aos 15, 30 e 45 dias após a aplicação dos fertilizantes.

### Altura de plantas (braquiária)

A ausência de diferença significativa entre os tratamentos na altura de plantas aos 22 dias (AP22) indica que, nas fases iniciais de desenvolvimento, o efeito residual do fósforo ainda não se manifestou de forma evidente. Isso ocorreu porque, durante os primeiros estádios de crescimento, as gramíneas utilizam principalmente as reservas de P contidas nas sementes, antes que o sistema radicular estivesse plenamente desenvolvido e capaz de explorar o solo (Santos *et al.*, 2006). À medida que a planta avança em seu desenvolvimento, a demanda por P aumenta, tornando o nutriente essencial para processos de divisão celular e expansão de tecidos (Nunes *et al.*, 2008).

Aos 45 dias após a semeadura, observou-se diferença significativa ( $p < 0,01$ ) entre as fontes de P para a altura de plantas, demonstrando que os diferentes fertilizantes impactaram de maneira distinta o crescimento da braquiária (Tabela 3).

Na AP45, o residual da fertilização com fosfato de cálcio e fosfato monoamônico (MAP) resultaram em plantas mais altas, com altura média de 33,34 e 30,85 cm, respectivamente (Tabela 4). O residual das demais formas de fertilização não se diferenciaram entre si, cuja altura média das plantas variou entre 24,75 e 26,40 cm. O fosfato de cálcio na dose de  $50 \text{ mg dm}^{-3}$ , proporcionou plantas com 39,21 cm de altura, sendo o único tratamento no qual as plantas se diferiram do controle zero P, cuja altura média foi de 27,92 cm (Tabela 3).

TABELA 3 - Altura de plantas (cm) de braquiária os 45 dias após a semeadura em função das fontes de fósforo (P)

Fonte de P	Doses de P (mg dm <sup>-3</sup> )				Média
	50	100	150	200	
Estruvita em pó	28,88	27,58	22,38	21,47	25,08 b
Estruvita granulada	25,54	24,17	22,96	26,33	24,75 b
Estruvita organomineral	25,5	24,08	27,63	27,58	26,20 b
Fosfato de cálcio	39,21*	33,67	30,54	29,96	33,34 a
Superfosfato Simples	28,04	25,46	26,00	26,08	26,40 b
MAP	29,92	30,00	31,58	31,92	30,85 a
Controle adicional	27,92				

Médias seguidas de mesma letra na coluna não se diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 % de probabilidade.

\*Médias que se diferem do controle adicional (zero fósforo).

A diferença observada entre as fontes de P reforça que o tipo de fertilizante fosfatado influencia o desempenho inicial das forrageiras, principalmente em solos de baixa fertilidade, típicos das regiões tropicais (Roberts; Johnston, 2015). O aumento da altura das plantas com o uso de fontes de liberação mais lenta, tal como; o fosfato de cálcio, indica melhor estabelecimento da pastagem, fator essencial para a competitividade com plantas daninhas e maior produção de biomassa inicial. A MAP aplicado na soja ainda forneceu P adequadamente para a braquiária (Tabela 3).

Os resultados sugerem que o uso de fosfato de cálcio e MAP foram mais eficientes para promover o crescimento inicial da braquiária, porque estas fontes deixaram residual maior de P no solo, enquanto as estruvitas provavelmente já tinham liberado o P para as culturas de soja e milho. Segundo Novais *et al.* (2007), o fósforo é um dos nutrientes mais limitantes nos solos tropicais devido a sua baixa disponibilidade e alta fixação nos coloides de argila e óxidos de ferro e alumínio. Portanto, a eficiência da adubação fosfatada está diretamente relacionada à solubilidade e liberação gradual do P no solo, o que pode explicar o melhor desempenho do fosfato de cálcio e do MAP, no terceiro cultivo e com estruvitas nos primeiros cultivos.

#### 4.2 Índice de Clorofila (SPAD)

Nos cultivos de soja, verificou-se que os tratamentos com estruvita em pó (EP) estruvita granulada (EG) e estruvita organomineral (EOM) promoveram valores mais elevados de SPAD, sugerindo melhores suprimentos de N e Mg associado à liberação gradual do P e foram compatíveis com os índices do MAP (Figura 3). Pela composição mineral dessas fontes, verificou-se que a EOM continha 5% de N e 4,5% de Mg e a EG, 8,5% e 13% de N e Mg,

respectivamente. Esse comportamento reforça a interação positiva entre o P e o metabolismo do N, uma vez que o P adequado favorece a síntese de ATP e nucleotídeos, essenciais à assimilação de N na planta (Zhang *et al.*, 2018).

O índice de clorofila (medido por meio do SPAD) é um parâmetro importante para estimar de forma indireta o estado nutricional das plantas, principalmente em relação ao nitrogênio, mas também sensível ao suprimento de P e Mg, nutrientes diretamente envolvidos na fotossíntese e na formação da molécula de clorofila (Taiz *et al.*, 2017; Malavolta *et al.*, 1997). Assim, pelos resultados dos índices SPAD sugere-se que tanto EOM, ou EG forneceram quantidades superiores.

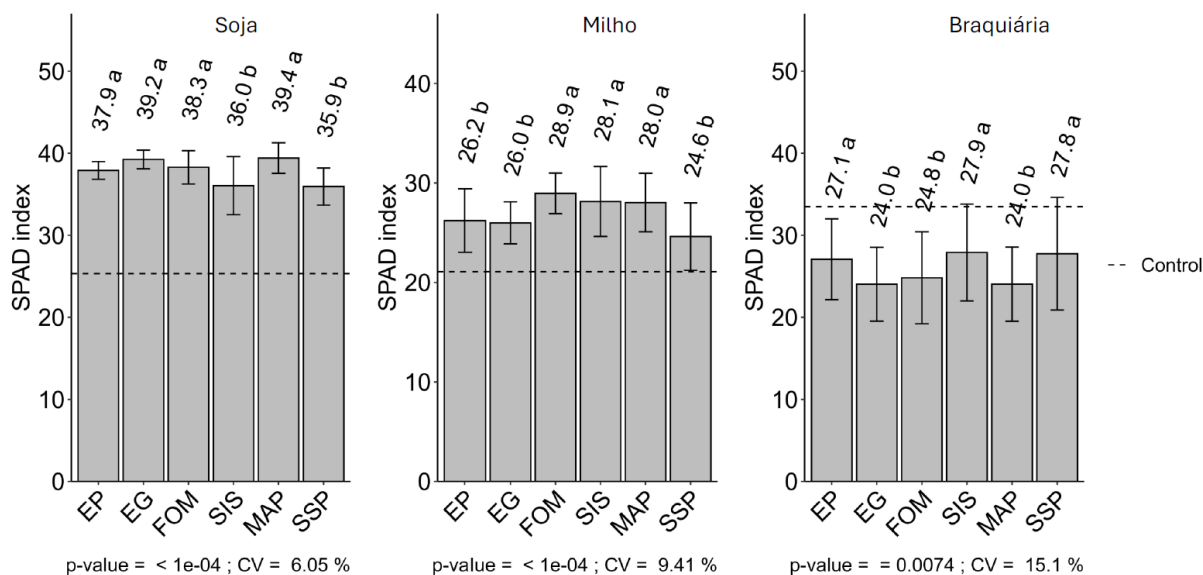


FIGURA 3 - Índice de clorofila nas plantas de soja, milho e braquiária, em função das adubações aos 45 dias (soja), aos 90 dias (milho) e aos 135 dias (braquiária), após aplicação dos fertilizantes.

No milho, o índice SPAD foi maior nos tratamentos com EOM, fosfato de cálcio (SIS) e MAP e, indicando que tanto a disponibilidade imediata de P (MAP) quanto o suprimento prolongado da estruvita (EOM) e do fosfato de cálcio (SIS) contribuíram para o aumento da clorofila foliar e, conseqüentemente, maior eficiência fotossintética das plantas (Figura 3). Estudos prévios demonstraram que a manutenção de altos valores de SPAD está correlacionada com o maior acúmulo de biomassa e rendimento em gramíneas, reforçando a importância da sincronia entre oferta e demanda de nutrientes (Machado *et al.*, 2020).

Na braquiária, a estruvita em pó (EP), o fosfato de cálcio (SIS) e o SSP se destacaram, mantendo níveis de SPAD mais estáveis, mesmo no terceiro cultivo sucessivo, utilizando

residual da adubação fosfatada. Isso se deve à lenta solubilização das fontes, garantindo fósforo residual e sustentando o metabolismo clorofiliano mesmo após cultivos exigentes (Figura 3). Cabeza *et al.* (2019), já haviam destacado essa característica, apontando a estruvita como fonte estratégica em sistemas integrados, devido a sua eficiência de longo prazo. Possivelmente a acidificação do solo com os cultivos promoveu a maior disponibilidade de P da estruvita em pó.

Portanto, os resultados evidenciaram que o índice SPAD não foi apenas um indicador do estado nitrogenado, mas também, uma ferramenta sensível para identificar a eficiência das fontes de P no suporte ao metabolismo vegetal. A superioridade das fontes menos solúveis ou de liberação mais lenta em manter níveis mais consistentes de clorofila sugere que a sua adoção pode garantir maior estabilidade produtiva em sistemas de sucessão de culturas ou mais tardiamente para a cultura.

### 4.3 Matéria seca da parte aérea das plantas de soja, milho e braquiária

A aplicação das diferentes fontes de P influenciou significativamente a produção de matéria seca da parte aérea das culturas de soja e milho (Figura 4).

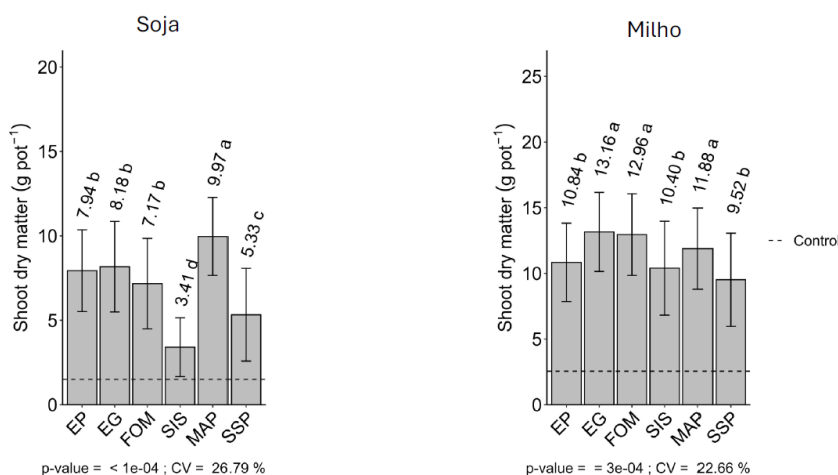


FIGURA 4 - Produção de massa seca da parte aérea nas plantas de soja (A) e milho (B) em função das adubações aos 45 dias (soja) e aos 90 dias (milho) após a aplicação dos fertilizantes.

No primeiro cultivo, com a soja, observou-se que, o MAP proporcionou maior MSPA (Figura 3A), porém no 2º cultivo aos 90 dias da aplicação das fontes de P, observou-se que, as

fontes EP, EG, EOM e MAP apresentaram os maiores valores de biomassa, variando entre 21 e 24 g, sem diferenças estatísticas entre si, mas significativamente superior ao SIS (17 g) e ao SSP (18 g). Com o passar do tempo, a estruvita granulada (EG) e a organomineral (EOM) tiveram desempenho semelhante ao MAP, que é um fertilizante solúvel (Figura 3B). A partir dos 90 DAS, a estruvita destacou-se pelo fornecimento gradual de fósforo.

A massa seca da parte aérea da braquiária (MSPA) foi significativamente influenciada pelas fontes e pela interação entre fonte e dose, o que evidencia que a resposta das plantas às doses aplicadas depende do tipo de fertilizante utilizado no 3º cultivo (Tabela 4). Essa interação reflete diferenças na solubilidade e no padrão de liberação do P entre as fontes.

TABELA 4 - Massa seca da parte aérea (g) de plantas de braquiária em função dos residuais das fontes e doses de fósforo (P) após 135 dias da aplicação

Fonte de P	Doses de P (mg dm <sup>-3</sup> )				Média
	50	100	150	200	
Estruvita em pó	6,60 b	6,27 b	5,50 b	4,16 c	5,63 b
Estruvita granulada	5,88 b	5,78 b	4,01 c	5,83 b	5,37 b
Estruvita organomineral	6,79 b	5,97 b	8,84 a*	7,76 a	7,34 a
Fosfato de cálcio	9,09 a*	8,38 a	7,31 a	6,41 b	7,80 a
Superfosfato Simples	7,31 b	7,31 a	6,10 b	5,87 b	6,65 a
MAP	7,01 b	7,63 a	7,10 a	7,47 a	7,30 a
Controle adicional					5,91

Médias seguidas de mesma letra na coluna não se diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.  
\*Médias que se diferem do controle adicional (zero fósforo).

A massa seca da parte aérea (MSPA) de plantas de braquiária variou conforme a fonte e a doses de P utilizadas (Tabela 4). Na dose de 50 mg dm<sup>-3</sup>, a maior MSPA (9,09 g) foi obtida com a fertilização à base de fosfato de cálcio, indicando maior eficiência na disponibilização do nutriente após 90 dias de aplicação dessa fonte. De forma semelhante, na dose de 100 mg dm<sup>-3</sup>, o fosfato de cálcio (8,38 g), o superfosfato simples (7,31 g) e o MAP (7,63 g) proporcionaram os melhores resultados, reforçando o papel das fontes mais solúveis em ainda disponibilizar fósforo para o desenvolvimento das plantas.

A fonte de estruvita com melhores resultados foi a EOM obtendo-se resultado positivo nas maiores doses de P (Tabela 4). Na literatura encontra-se resultados positivos com estruvita exclusivamente mineral, divergindo desse experimento. De acordo com Meira (2020), a estruvita apresenta característica de liberação controlada, garantindo fornecimento contínuo de P ao longo do ciclo da cultura. Essa propriedade justifica a manutenção do crescimento e do acúmulo de biomassa em períodos prolongados, característica desejável em sistemas de

produção sustentáveis. Resultados semelhantes aos de Meira (2020), foram observados por Walz (2021), ao avaliar o uso de estruvita em substituição a fertilizantes convencionais em culturas de arroz, confirmando sua eficiência agrônômica e potencial ambiental.

Por outro lado, as doses de fósforo isoladamente não apresentaram efeito significativo sobre nenhuma variável analisada. Esse comportamento indica que, dentro do intervalo de 50 a 200 mg dm<sup>-3</sup>, as plantas de braquiária possivelmente atingiram o nível crítico de P necessário para seu desenvolvimento, não havendo resposta adicional com o aumento da dose. Essa ausência de resposta pode estar associada à capacidade tampão do solo e à cinética de absorção radicular, conforme descrito por Novais *et al.* (2007) e corroborado por estudos sobre níveis críticos de P em gramíneas forrageiras tropicais (Santos, 2020).

Entretanto, em doses mais elevadas (150 e 200 mg dm<sup>-3</sup>), destaca-se o desempenho da estruvita organomineral (EOM), que promoveu valores de MSPA de 8,84 g e 7,76 g, respectivamente, semelhantes ou superiores às fontes altamente solúveis. Esse comportamento pode estar relacionado à liberação gradual de fósforo a partir da matriz orgânica e com maior tempo de aplicação no solo, favorecendo a absorção de P durante o terceiro cultivo. Resultados semelhantes foram observados por Talboys *et al.* (2016), que relataram que a estruvita apresenta um padrão de dissolução lenta e controlada, proporcionando um fornecimento mais equilibrado de fósforo.

Além disso, o fato de apenas os tratamentos com fosfato de cálcio (50 mg dm<sup>-3</sup>) e estruvita organomineral (150 mg dm<sup>-3</sup>) diferirem significativamente do controle sem fósforo (5,91 g) sugere que a eficiência de uso do nutriente depende não apenas da dose, mas também da interação entre a fonte e a dinâmica de liberação no solo. Como destacam Katanda *et al.* (2016), a eficiência agrônômica das fontes alternativas de fósforo de liberação lenta pode ser equiparável às fontes minerais convencionais, desde que haja sincronia entre a liberação do nutriente e a demanda fisiológica da planta.

A comparação dos tratamentos com o controle adicional (zero P) revelou diferenças significativas apenas para AP45 e MSPA, reforçando que a deficiência de fósforo limita o crescimento e o acúmulo de biomassa aérea. O fósforo é essencial na transferência de energia e no metabolismo celular, sendo indispensável, para a formação de compostos energéticos e ácidos nucleicos (Nunes *et al.*, 2008). Assim, sua ausência compromete a fotossíntese, o metabolismo energético e o desenvolvimento radicular, reduzindo a eficiência de absorção de outros nutrientes.

De forma geral, os resultados demonstraram que as fontes de fósforo exercem influência determinante, sobre o desempenho fisiológico e produtivo da braquiária, enquanto as doses

avaliadas, isoladamente, não apresentaram efeito significativo. A interação entre fonte e dose para MSPA reforça a importância de se considerar não apenas a quantidade aplicada, mas também, o tipo de fertilizante fosfatado utilizado, visando maior eficiência agrônômica e sustentabilidade ambiental no manejo da adubação fosfatada em pastagens tropicais (Meira, 2020; Walz, 2021; Santos *et al.*, 2006).

As fontes com liberação controlada, como a estruvita organomineral, apresentam potencial para substituir parcialmente fertilizantes solúveis, promovendo melhor aproveitamento do fósforo e reduzindo perdas ambientais. Isso reforça o papel da estruvita como uma alternativa sustentável para o manejo racional de nutrientes em sistemas agrícolas (Memelli, 2018).

Além disso, a maior resposta obtida com o uso de fontes recicladas como estruvita reforça seu potencial estratégico para a sustentabilidade agrícola, reduzindo a dependência de fontes minerais importadas e contribuindo para a reciclagem de nutrientes (Cordero *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2020).

Segundo Novais; Smyth (1999) e Rehman *et al.* (2022), a liberação gradual de P que reduz as perdas por fixação e aumenta a eficiência de uso de P em solos tropicais com alta fixação de P, como o solo utilizado neste ensaio.

#### **4.4 Acúmulo de nitrogênio na parte aérea**

O acúmulo de nitrogênio (N) na parte aérea das plantas apresentou resposta diferenciada de acordo com as fontes de fósforo avaliadas (Figura 5). Na soja, verificou-se que os tratamentos com estruvita (EP, EG e EOM) e MAP resultaram em maiores acúmulos de N em comparação ao SSP e SIS e ao controle sem P (Figura 5). Esse desempenho pode relacionar-se à melhor disponibilidade de fósforo com estas fontes, uma vez que o P desempenha papel fundamental na assimilação do nitrogênio e no crescimento radicular, favorecendo a fixação biológica e a absorção do nutriente (Marschner, 2012; Vance; Uhde-Stone; Allan, 2003).

Esses resultados refletem não apenas na liberação do P, mas também, ao estímulo à atividade radicular e nodulação, fundamentais para a fixação biológica de nitrogênio (FBN). Isso é coerente com relatos de que a adequada disponibilidade de P aumenta a eficiência da simbiose soja, do *Bradyrhizobium spp* e, conseqüentemente, o acúmulo de N (Almeida *et al.*, 2019).

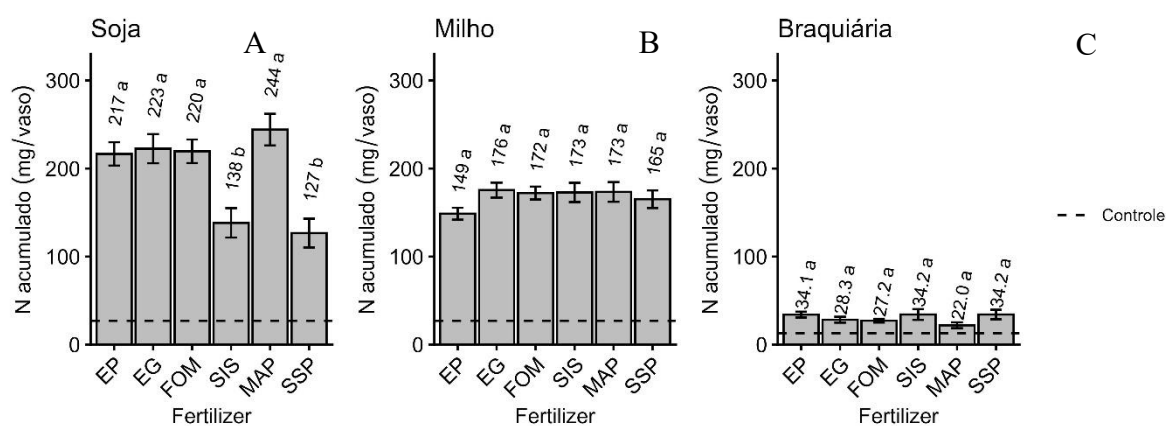


FIGURA 5 - Acúmulo de nitrogênio de massa seca da parte aérea nas plantas de soja, milho e braquiária (C) em função das adubações aos 45 dias (soja), aos 90 dias (milho) e aos 135 dias (braquiária) após a aplicação dos fertilizantes.

No milho e na braquiária não houve diferença no acúmulo de N na MSPA (Figura 4B e 4C). Esse resultado pode ser explicado pela sincronia entre a liberação do P e N para as culturas, pois as doses de N foram fornecidas a cultura do milho, pela solução de nutrientes aplicada (Dias *et al.*, 2022). Estudos semelhantes relataram que a disponibilidade adequada de fósforo e nitrogênio, reflete diretamente em maior acúmulo na parte aérea (Cantarella; Marcelino; Souza, 2007; Cabeza *et al.*, 2019).

De modo geral, os resultados indicaram que as fontes alternativas de fósforo, em especial a estruvita independente da forma, contribuíram para a manutenção de níveis adequados de N nas culturas avaliadas. Isso reforça o potencial dessas fontes não apenas em fornecer P de forma sustentável, mas também, em favorecer processos fisiológicos que otimizam a nutrição nitrogenada e, conseqüentemente, o desempenho das culturas.

#### 4.5 Acúmulo de fósforo na parte aérea

O acúmulo de fósforo (P) na parte aérea das culturas variou de acordo com as fontes aplicadas, evidenciando o papel central desse nutriente na produtividade vegetal (Figura 6). No cultivo de soja, observou-se que as fontes alternativas, especialmente as estruvitas (EP, EG e EOM), proporcionaram maior acúmulo de P e semelhante ao MAP, quando comparadas ao SIS, SSP e ao controle (Figura 6A). O MAP, por sua alta solubilidade, promoveu resposta imediata, enquanto o fosfato de cálcio (SIS) e o superfosfato simples (SPS) apresentaram menores disponibilidades de P.

No milho, as estruvitas em pó (EP) e granulada (EG) destacaram-se entre as fontes, com desempenho superior aos demais fertilizantes (Figura 6B). Na braquiária, as estruvitas granulada (EG) e organomineral (EPM) destacaram-se entre as fontes, com desempenho superior aos demais fertilizantes (Figura 6C). Essa resposta pode ser atribuída à liberação gradual do P, que manteve níveis adequados de disponibilidade ao longo do ciclo, promovendo maior eficiência de absorção (Talboys et al., 2016; Menezes-Blackburn et al., 2018).

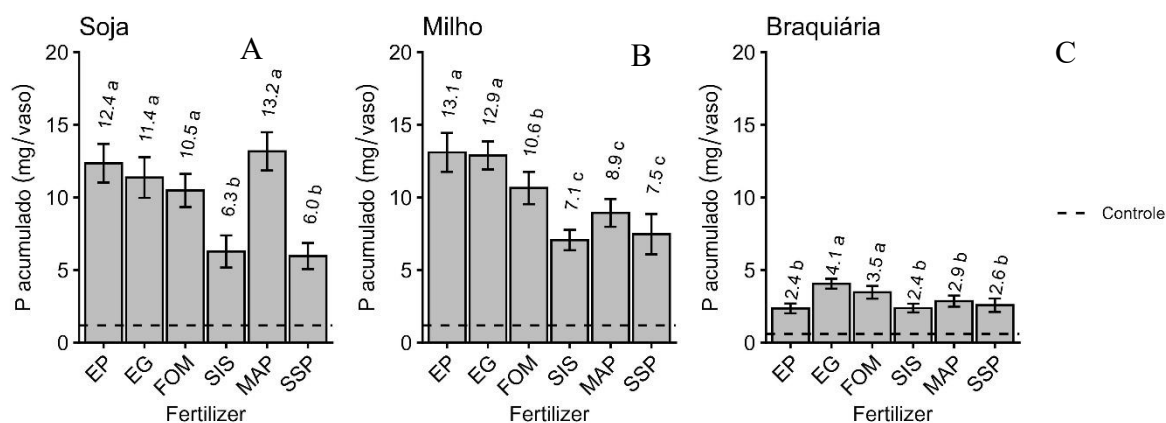


FIGURA 6 - Acúmulo de fósforo de massa seca da parte aérea nas plantas de soja e milho em função das adubações aos 45 dias (soja) e aos 90 dias (milho) após a aplicação dos fertilizantes.

Esses resultados sugerem que a estruvita, sobretudo quando granulada (EG) e associada a uma matriz orgânica (EOM), apresentam maior eficiência agrônômica que os fosfatos solúveis com o tempo de aplicação mais prolongado, uma vez que a liberação lenta mantém a disponibilidade de P por mais tempo, beneficiando o desenvolvimento das plantas em sistemas de cultivo sucessivos (Kumar *et al.*, 2019; Katanda *et al.*, 2021).

Esse resultado reforça a importância da sincronia entre a demanda nutricional da cultura e a dinâmica de solubilização das fontes de P, especialmente em cultivos de ciclo curto e elevada exigência (Wang *et al.*, 2023).

De maneira geral, os resultados evidenciam que as fontes à base de estruvita, seja na forma pura ou em formulações organominerais, são capazes de manter acúmulo adequado de fósforo nas plantas mesmo em sucessões de cultivo, confirmando sua residualidade e eficiência agrônômica. Essa constatação corrobora trabalhos recentes que apontam a estruvita como fertilizante estratégico na agricultura moderna, devido à sua capacidade de reduzir perdas por lixiviação e aumentar o aproveitamento do P aplicado (Cabeza *et al.*, 2019; Hertzberger *et al.*, 2020).

#### 4.6 Acúmulo de macronutrientes na parte aérea das plantas de soja, de milho e de braquiária

O acúmulo dos demais macronutrientes na parte aérea da soja apresentou forte variação em função das fontes de P aplicadas (Figura 7). A aplicação do MAP favoreceu maior acúmulo K, Mg e Ca na MSPA.

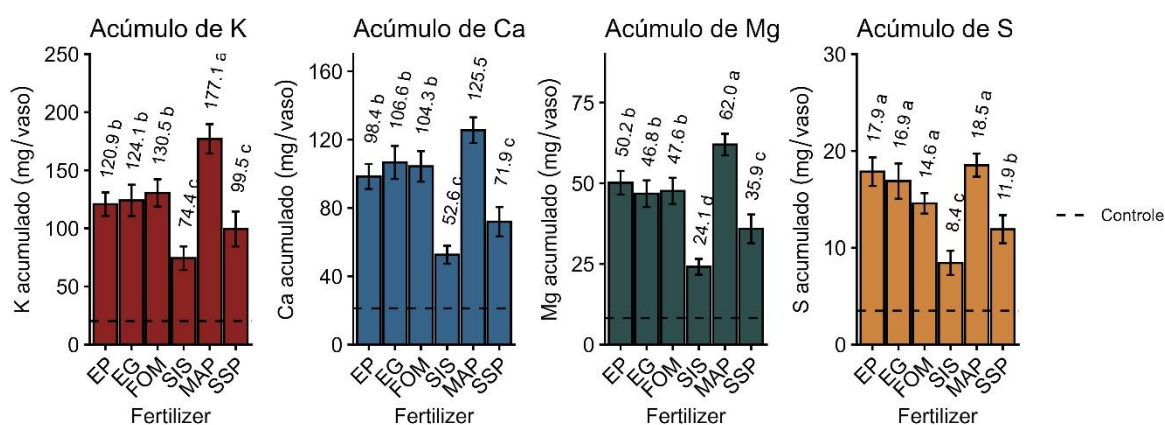


FIGURA 7 - Acúmulo dos nutrientes K, Ca, Mg e S na massa seca da parte aérea das plantas de soja em função das adubações.

Apenas as estruvitas EP e EG promoveram maior acúmulo inicial de S, semelhante ao MAP. O SSP mesmo com cálcio (Ca) e enxofre (S), presentes em sua formulação não foi superior ao acúmulo de Ca e S, destacando a menor disponibilidade dessa fonte (NOVAIS; SMYTH, 1999).

De forma geral, os resultados evidenciam que as fontes alternativas de P não apenas garantem suprimento de P, como também, influenciaram positivamente a absorção de outros nutrientes, reforçando seu papel estratégico no manejo sustentável da cultura da soja.

Na cultura do milho, observou-se que as diferentes fontes de fósforo não impactaram de maneira significativa o acúmulo de Ca e Mg na parte aérea, sendo semelhantes independentemente das fontes de P utilizadas (Figura 8). O tratamento com estruvita em pó (EP) proporcionou maior eficiência no fornecimento de Ca, demonstrando a capacidade dessa fonte em absorver mais Ca. Esse comportamento corrobora os resultados descritos por Cabeza *et al.* (2024), que destacaram o papel dessa fonte de liberação lenta na manutenção do aporte nutricional em cultivos sucessivos.

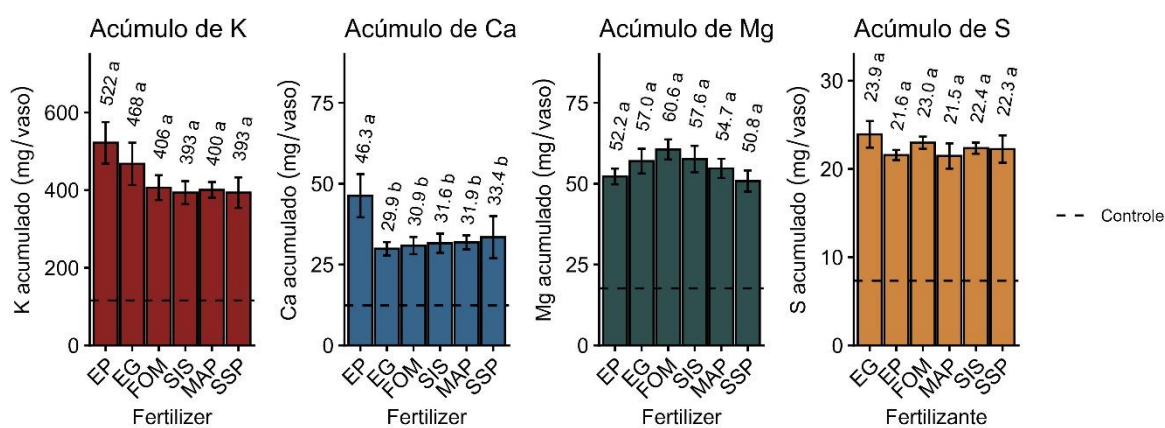


FIGURA 8 - Acúmulo dos nutrientes K, Ca, Mg e S ne massa seca da parte aérea das plantas de milho em função das adubações.

Na braquiária, no terceiro cultivo, as fontes SIS e SSP, apresentaram maior acúmulo de S na parte aérea semelhante aos tratamentos com estruvita em pó (EP) e granulada (EG), quando comparados com o MAP (Figura 9). O desempenho dessas fontes SIS e SSP, está associado à liberação gradual do fósforo, que possibilitou melhor aproveitamento residual ao longo do tempo, mantendo o fornecimento contínuo do enxofre.

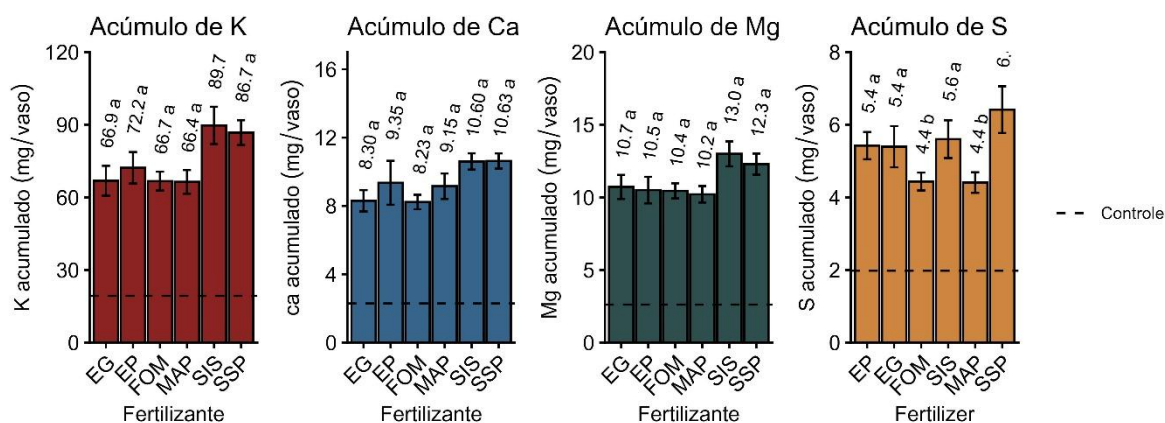


FIGURA 9 - Acúmulo dos nutrientes K, Ca, Mg e S ne massa seca da parte aérea das plantas de braquiária em função das adubações.

#### 4.7 Crescimento e acúmulo de nutrientes na massa seca da parte aérea das culturas:

A aplicação de doses crescentes de fósforo (50, 100, 150 e 200 mg dm<sup>-3</sup>) na cultura da soja resultaram em incrementos progressivos na massa seca da parte aérea e no acúmulo de nutrientes pela soja, refletindo o papel fundamental do P, na promoção do crescimento e no

metabolismo da cultura (Figura 10). Observou-se que, houve incremento linear no acúmulo de P e K

Esses resultados confirmam que o fornecimento adequado de P é determinante para a formação de biomassa e para o funcionamento eficiente dos processos fisiológicos da planta (Grant *et al.*, 2001; Novais *et al.*, 2007).

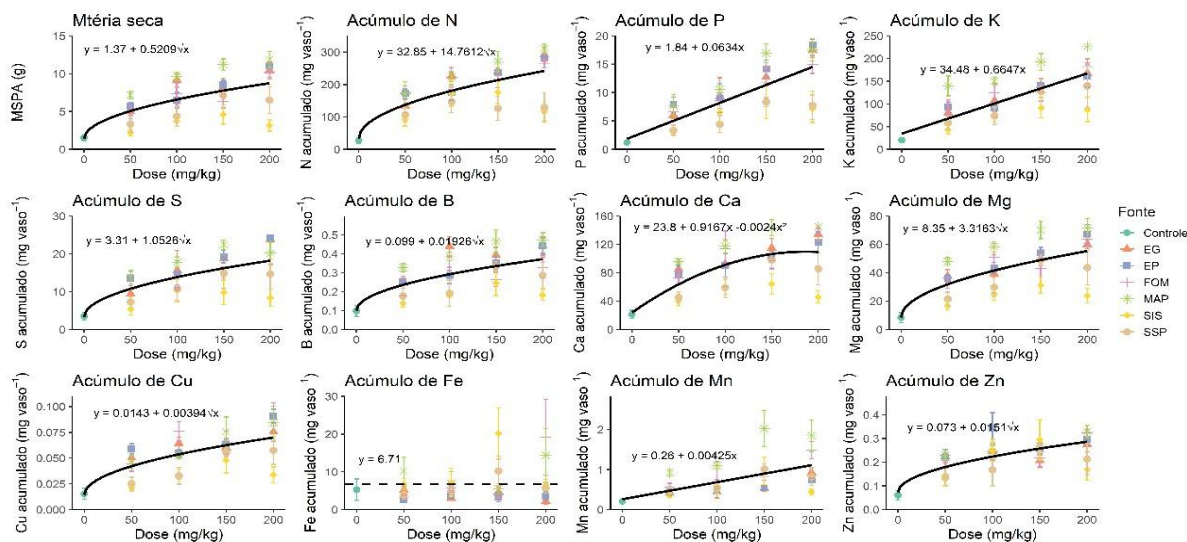


FIGURA 10 - Acúmulo de nutrientes de massa seca da parte aérea das plantas de soja em função das doses de fósforo.

Portanto, a resposta da soja às doses crescentes de fósforo demonstra que a adubação fosfatada não apenas maximiza a produção de biomassa, mas também, garante maior eficiência na absorção e utilização de outros nutrientes, refletindo-se em melhor desempenho fisiológico e produtivo.

A relação entre o aumento das doses e a absorção de N explica-se pelo estímulo do fósforo sobre a nodulação e a fixação biológica de nitrogênio, além de favorecer a atividade radicular. Isso está em consonância com os relatos de Vance, Uhde-Stone e Allan (2003), que destacam o papel do P na simbiose com rizóbios e no crescimento de raízes mais profundas e ramificadas.

No segundo cultivo, com milho, os efeitos residuais das doses de fósforo foram ainda mais evidentes, considerando a elevada exigência nutricional dessa cultura (Figura 11). Observou-se que o incremento das doses (50, 100, 150 e 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) impactaram linearmente na massa seca da parte aérea e no acúmulo de nutrientes.

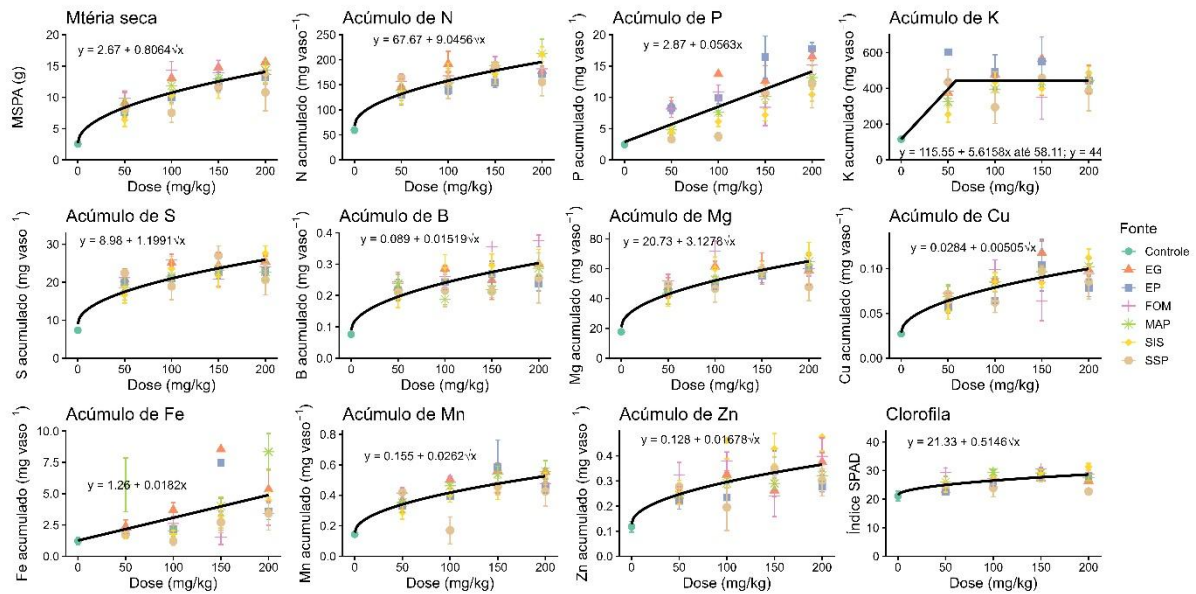


FIGURA 11 - Acúmulo de nutrientes de massa seca da parte aérea das plantas de milho em função das doses de fósforo.

Na dose de 200 kg ha<sup>-1</sup>, a EG proporcionou os maiores valores de acúmulo de fósforo, superando inclusive o MAP e mantendo elevada eficiência no fornecimento residual. Esse resultado confirmou a capacidade da estruvita em atender à demanda contínua da cultura, evitando flutuações bruscas na disponibilidade de P ao longo do ciclo (CABEZA et al., 2024).

Em relação ao acúmulo de nitrogênio (N), os melhores resultados ocorreram nas doses intermediárias (100 e 150 kg ha<sup>-1</sup>), especialmente quando associadas ao EOM. A matéria orgânica presente no fertilizante favoreceu a retenção do N no solo e a atividade microbiana, promovendo mineralização gradual e aproveitamento eficiente do nutriente (MENEZES-BLACKBURN et al., 2018).

O potássio (K) e o magnésio (Mg) também apresentaram incrementos proporcionais às doses aplicadas, sendo as fontes de liberação lenta (EG e EOM) mais eficientes em sincronizar a oferta com a demanda nutricional do milho em estádios avançados de desenvolvimento. Por outro lado, o MAP e o SSP mostraram respostas iniciais mais intensas, mas com queda acentuada de disponibilidade nos estádios finais do ciclo.

Esses resultados reforçaram que a utilização de fontes alternativas como estruvita, especialmente em doses elevadas (150–200 mg dm<sup>-3</sup>), representa uma estratégia eficiente para o milho, garantindo não apenas maior produtividade potencial, mas também, estabilidade no suprimento nutricional ao longo do tempo.

#### 4.8 Acúmulo de nutrientes na braquiária no terceiro cultivo

A braquiária, cultivada em sucessão à soja e ao milho, respondeu de forma diferenciada às doses crescentes de fósforo (50, 100, 150 e 200 mg dm<sup>-3</sup>) pode ser visualizado pela Figura 12. Observou-se que, mesmo após dois cultivos anteriores, a espécie manteve capacidade expressiva de absorção de P residual, evidenciando seu sistema radicular agressivo, característico de gramíneas forrageiras tropicais (Fageria; Baligar; Jones, 2011). Essa capacidade de explorar camadas subsuperficiais do solo explica o maior acúmulo de nutrientes em tratamentos com doses mais altas, mas também revela aproveitamento satisfatório do P remanescente nas doses intermediárias (100 e 150 mg dm<sup>-3</sup>).

Além do P, a braquiária apresentou aumento significativo no acúmulo de N e Mg, especialmente nas maiores doses de 150 e 200 mg dm<sup>-3</sup>, refletindo tanto o efeito direto da disponibilidade de P na ativação do metabolismo energético da planta quanto interações positivas entre fósforo e a absorção de outros nutrientes (Marschner, 2012). Esse comportamento está em consonância com estudos que destacam a braquiária como espécie eficiente em ciclagem e aproveitamento de nutrientes residuais, desempenhando papel fundamental em sistemas integrados de produção (Souza; Oliveira; Pulrolnik, 2021).

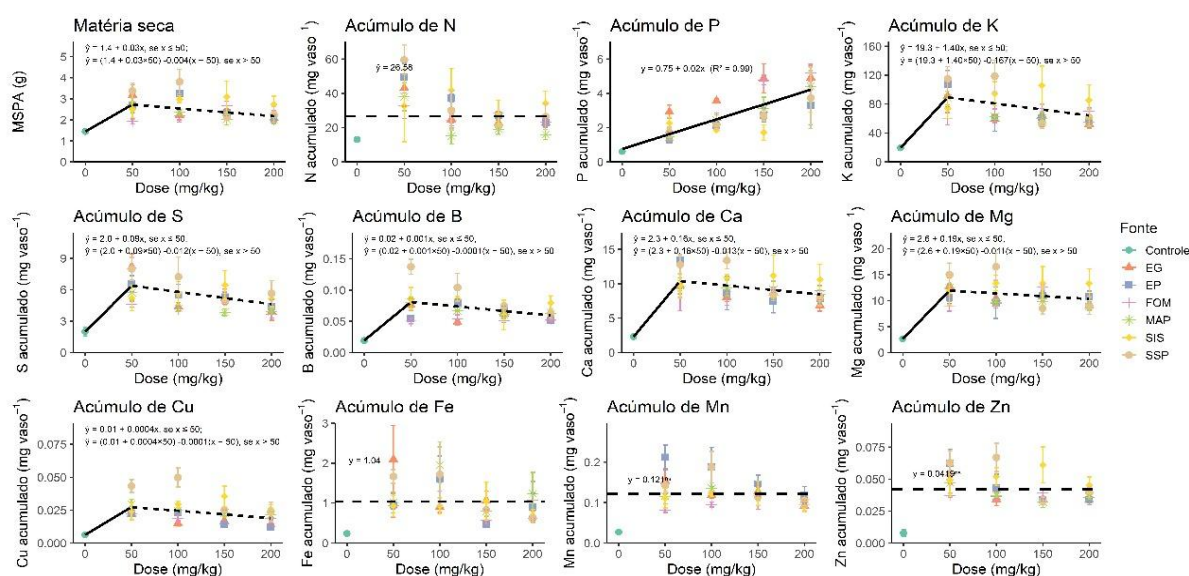


FIGURA 12 - Acúmulo de nutrientes de massa seca da parte aérea das plantas de braquiária em função das doses de fósforo.

Assim, os resultados confirmaram a importância da braquiária não apenas como cultura de cobertura, mas como componente estratégico na reciclagem de nutrientes e na eficiência do

uso do fósforo aplicado, principalmente em contextos de fertilização com fontes alternativas e sustentáveis (Souza; Oliveira; Pulrolnik, 2021).

#### 4.9 Produção de matéria seca e biodisponibilidade de fósforo acumulado nos três cultivos

A análise do acumulado nos três cultivos (soja, milho e braquiária) evidenciou diferenças consistentes entre as fontes de fósforo (P) avaliadas (Figura 13). Observou-se que, as fontes de estruvita (EP, EG e EOM) apresentaram maior desempenho, mantendo níveis adequados de P ao longo de toda a sequência de cultivos. Essa característica relaciona-se à baixa solubilidade imediata e à liberação gradual de P, o que contribuiu para maior eficiência no aproveitamento residual, mesmo em sistemas de cultivo intensivo (Tan *et al.*, 2021).

No milho e braquiária, culturas mais exigentes em termos nutricionais, a disponibilidade contínua proporcionada pelas fontes alternativas permitiu acúmulo consistente de P, N, Mg e micronutrientes. Esse resultado reforçou a importância da estruvita em contextos de sucessão de culturas, reduzindo perdas por lixiviação e aumentando na sustentabilidade do sistema produtivo (Cetec, 2020; Withers *et al.*, 2018).

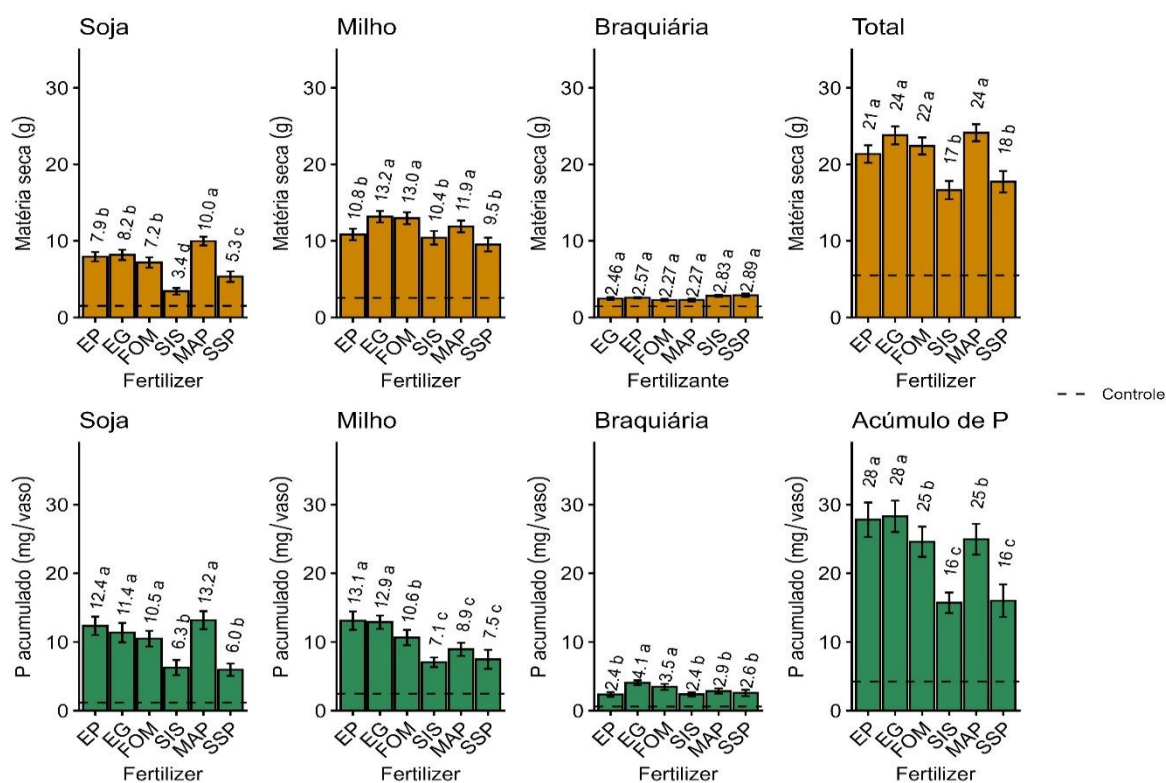


FIGURA 13 - Massa seca total da parte aérea das plantas nos três cultivos e biodisponibilidade de P em função dos fertilizantes.

As fontes convencionais (MAP e SSP) apresentaram resposta imediata significativa, sobretudo na soja (Figura 13), promovendo rápido acúmulo de P nas fases iniciais. No entanto, esse efeito foi reduzido nos cultivos subsequentes, indicando menor aproveitamento residual em comparação às fontes alternativas. Trabalhos semelhantes apontaram que fertilizantes de alta solubilidade, embora eficazes no curto prazo, podem apresentar menor eficiência agrônômica quando considerados em sistemas de cultivo em sucessão (RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996; OLIVEIRA JÚNIOR *et al.*, 2020).

Os resultados acumulados deste estudo demonstraram que as fontes alternativas de P, especialmente as de base organomineral, apresentaram potencial estratégico na agricultura sustentável. Além de reduzirem a dependência de jazidas de fosfato natural, promoveram a reciclagem de nutrientes provenientes de resíduos agroindustriais, alinhando-se a políticas de economia circular e conservação de recursos minerais (CORDELL; WHITE, 2014; SARITO *et al.*, 2021).

#### **4.10 Fósforo residual no solo após os três cultivos**

Quanto maior a dose de P, maior o teor residual no solo (Figura 14 A). A avaliação do fósforo residual no solo ao final dos três cultivos mostrou diferenças expressivas entre as fontes aplicadas (Figura 14). As fontes convencionais de alta solubilidade, como o MAP e o SSP, apresentaram maior disponibilidade imediata, elevando significativamente os teores de P logo após a aplicação. No entanto, esse efeito foi pouco persistente, com quedas acentuadas nos cultivos subsequentes, indicando maior extração inicial e/ou maior fixação em formas indisponíveis com o passar dos cultivos (Novais; Smyth, 1999).

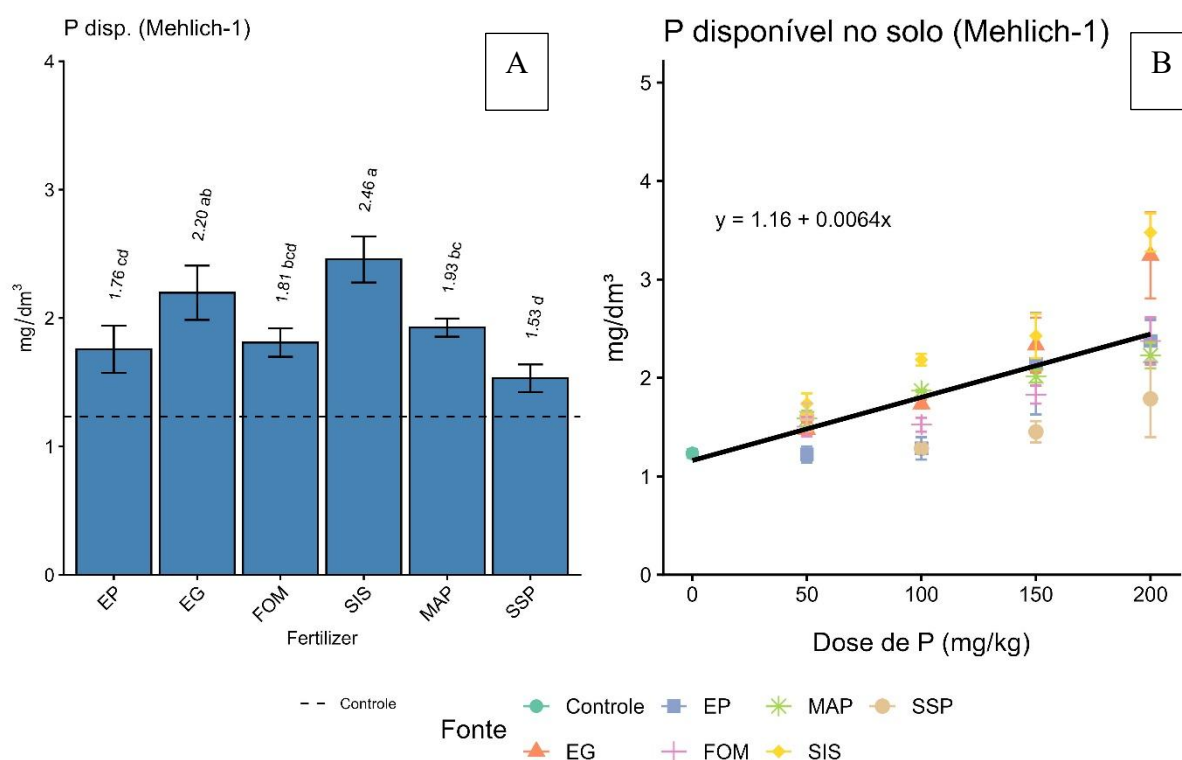


FIGURA 14 - Fósforo residual no solo após os cultivos sucessivos de soja e milho em função das adubações aos 135 dias após a aplicação dos fertilizantes.

Por outro lado, as fontes alternativas derivadas da estruvita (EP, EG e EOM) mantiveram concentrações mais estáveis de P no solo ao longo dos cultivos (Figura 14). Esse comportamento pode ser atribuído à sua baixa solubilidade inicial e à liberação gradual do nutriente, o que contribuiu para a manutenção de teores adequados de P-Resina, especialmente no cultivo da braquiária. Essa característica de residualidade é particularmente relevante em sistemas de cultivo sucessivos, pois garante aporte contínuo de fósforo sem necessidade de reaplicações frequentes (TALBOYS *et al.*, 2016; CABEZA *et al.*, 2019).

O fertilizante organomineral à base de estruvita (EOM) apresentou efeito adicional na manutenção do P residual, provavelmente associada à matéria orgânica presente em sua composição, que pode reduzir a fixação do fósforo em formas não lábeis e melhorar a disponibilidade para as plantas (MENEZES-BLACKBURN *et al.*, 2018). Essa interação solo-matéria orgânica-nutrientes sugere que os organominerais possuem potencial de aumentar a eficiência de uso do fósforo, além de melhorar propriedades químicas do solo.

De forma geral, a análise do P residual confirma a hipótese de que fontes alternativas, principalmente a estruvita e suas combinações organominerais, podem desempenhar papel estratégico na agricultura moderna. Ao promover maior eficiência de uso e reduzir as perdas

ambientais, essas fontes se apresentam como ferramentas essenciais, para o manejo sustentável do fósforo, recurso finito e de elevada importância para a segurança alimentar global (HERTZBERGER *et al.*, 2020).

#### 4.11 Análise canônica para o cultivo de soja

A análise canônica realizada para o primeiro cultivo de soja possibilitou identificar as relações entre as variáveis de crescimento (altura de plantas, índice de clorofila, matéria seca da parte aérea) e os atributos de acúmulo de nutrientes (N, P e K), em função das diferentes doses de fósforo aplicadas (Figura 15). O método estatístico de análise canônica é amplamente utilizado em experimentos agrônômicos para compreender a contribuição relativa de cada variável, permitindo separar os efeitos diretos e indiretos de nutrientes e atributos de solo sobre o desenvolvimento das plantas (FERREIRA, 2018; CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI, 2012).

Os resultados obtidos demonstraram que as doses de P, especialmente 100 e 150 mg kg<sup>-1</sup>, promoveram maior associação entre o acúmulo de N e P na parte aérea e a produção de biomassa. A proximidade dos vetores dessas variáveis no biplot canônico indica correlação positiva, sugerindo que o aporte de fósforo favoreceu a absorção e utilização eficiente de nitrogênio pela soja, em concordância com o observado por Novais *et al.* (2007), que destacam o papel fundamental do fósforo na fixação simbiótica e na manutenção do metabolismo energético.

Outro aspecto importante observado na análise é que os tratamentos com doses mais baixas (0 e 50 mg kg<sup>-1</sup>) ficaram posicionados em regiões opostas no gráfico, indicando baixa correlação com os parâmetros produtivos. Esse resultado evidencia a limitação nutricional do fósforo em solos de Cerrado, caracterizados por elevada fixação do nutriente e baixa disponibilidade natural (VILELA *et al.*, 2004).

Além disso, a análise canônica destacou que a variável índice SPAD (clorofila) apresentou relação intermediária com os atributos produtivos, reforçando que, embora seja um bom indicador do estado nutricional em N, sua resposta está condicionada ao balanço com outros nutrientes, principalmente o P, que desempenha função essencial nos processos bioquímicos fotossintéticos (TAIZ *et al.*, 2017).

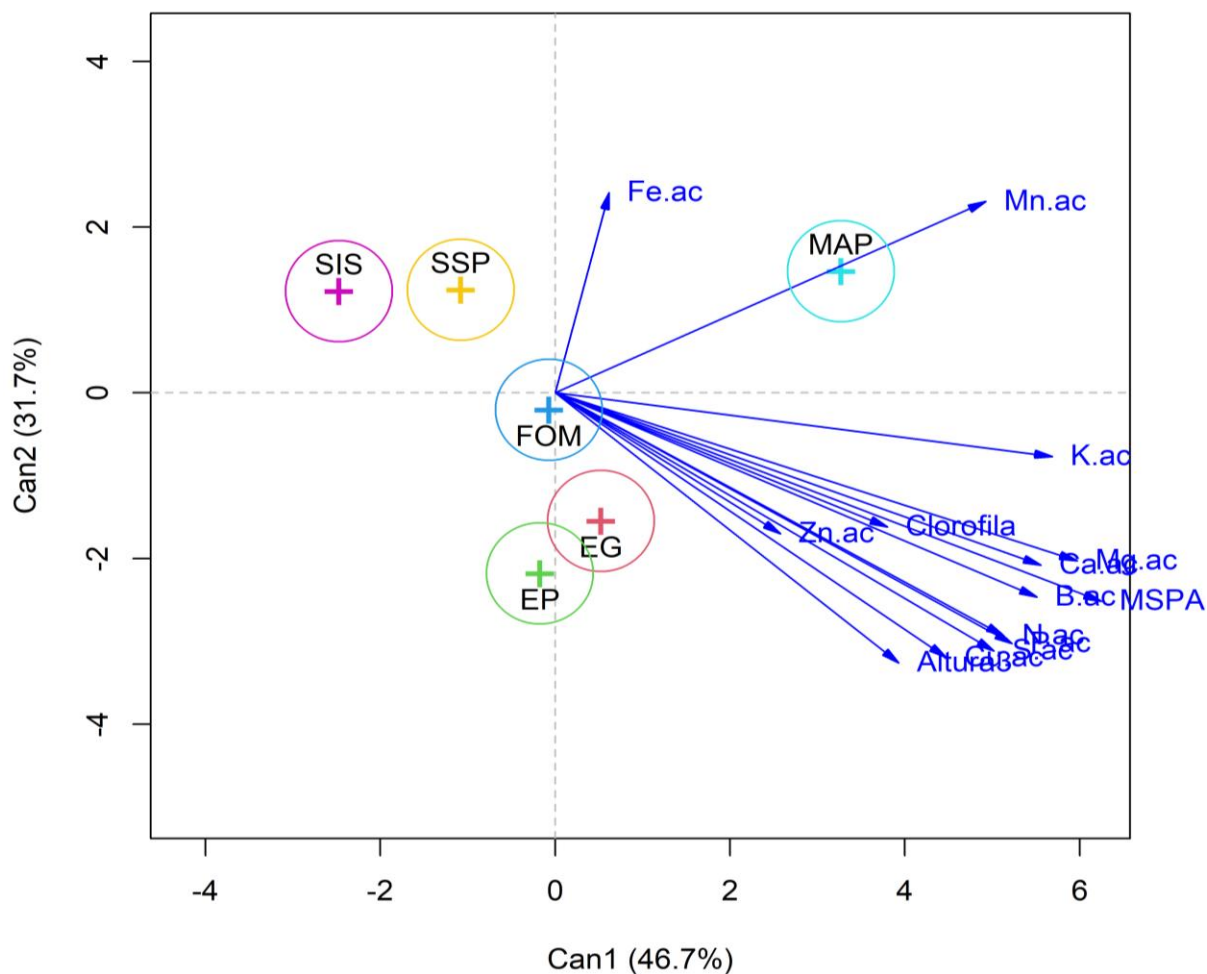


FIGURA 15 - Análise canônica para o cultivo da soja em função dos fertilizantes.

De maneira geral, a análise multivariada confirmou que aplicação de fósforo via estruvita resultou em comportamento semelhante aos fertilizantes solúveis tradicionais (MAP e SSP), sugerindo que a liberação gradual do P pela estruvita pode atender à demanda inicial da soja sem comprometer a eficiência do sistema produtivo.

#### 4.12 Análise canônica para o milho (2º cultivo)

A análise canônica realizada para o segundo cultivo (milho) permitiu compreender as relações entre as doses de P aplicadas, os atributos químicos do solo e o acúmulo de nutrientes na parte aérea. Esse tipo de abordagem multivariada possibilitou identificar a contribuição relativa de cada variável e a interdependência entre os fatores de solo e planta, sendo amplamente utilizado em experimentos de fertilidade (FERREIRA, 2018; CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI, 2012).

Os resultados obtidos evidenciaram que as doses intermediárias de fósforo (100 e 150 mg kg<sup>-1</sup>) apresentaram maior associação com a produção de matéria seca e com o acúmulo de N, P e K na parte aérea, corroborando com estudos que destacam a elevada exigência do milho em fósforo, para sustentar o crescimento vegetativo e reprodutivo (Fancelli; Dourado Neto, 2000; Nunes *et al.*, 2011).

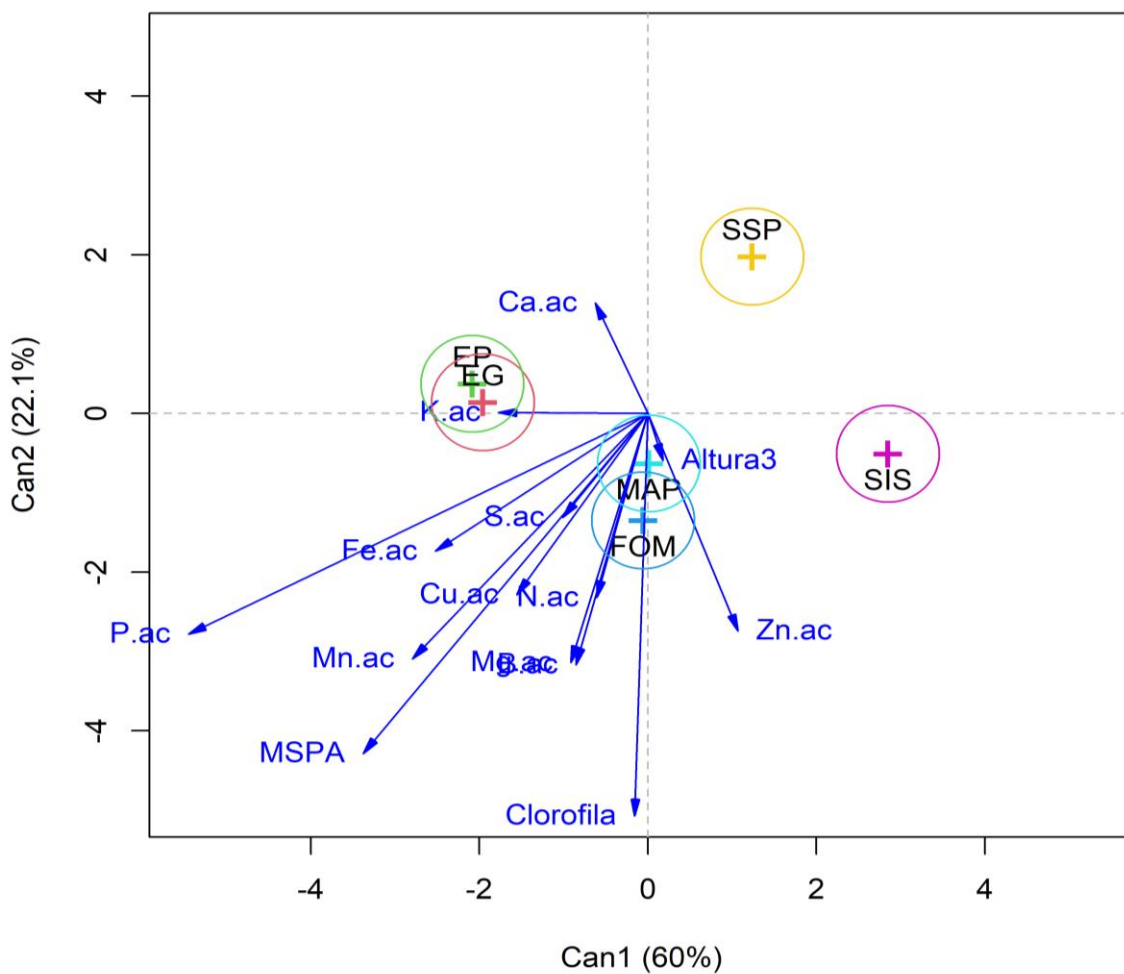


FIGURA 16 - Análise canônica para o cultivo do milho em função dos fertilizantes.

No biplot da análise canônica (Figura 16), observou-se que, os vetores referentes ao acúmulo de fósforo e nitrogênio ficaram próximos, indicando correlação positiva entre esses nutrientes. Essa relação explica-se pelo papel do P no metabolismo energético, essencial para a assimilação de N, especialmente em culturas de elevado potencial produtivo, como o milho (TAIZ *et al.*, 2017; NOVAIS *et al.*, 2007).

As doses mais baixas (0 e 50 mg kg<sup>-1</sup>) ficaram distantes das variáveis associadas à produtividade, evidenciando limitações nutricionais severas, em função da baixa

disponibilidade de P no solo, típica de Latossolos do Cerrado (VILELA et al., 2004). Além disso, a análise multivariada mostrou que a aplicação de estruvita manteve comportamento semelhante ao de fontes convencionais (MAP e SSP), reforçando seu potencial como alternativa sustentável de adubação fosfatada.

Portanto, a análise canônica confirmou que a disponibilidade adequada de P foi determinante, para a eficiência do uso de nutrientes e para a expressão do potencial produtivo do milho, sendo a estruvita uma fonte promissora de fósforo no contexto da agricultura tropical.

#### **4.13 Análise canônica para a braquiária (3º cultivo)**

A análise canônica aplicada ao terceiro cultivo (braquiária) mostrou-se fundamental para compreender a resposta da forrageira às doses crescentes de fósforo, bem como sua interação com os atributos químicos do solo (Figura 17). Esse tipo de abordagem é especialmente útil em experimentos de sistemas de rotação, em que múltiplas variáveis interagem de forma simultânea (FERREIRA, 2018; CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI, 2012).

Os resultados indicaram que as doses mais elevadas de P (150 e 200 mg kg<sup>-1</sup>) estiveram mais associadas ao acúmulo de fósforo, cálcio e magnésio na parte aérea da braquiária, reforçando seu papel como cultura eficiente na ciclagem de nutrientes e na recuperação de áreas com baixa fertilidade (Martuscello et al., 2009; Soares Filho *et al.*, 2012).

No biplot, observou-se forte proximidade entre as variáveis relacionadas à produção de biomassa e ao acúmulo de fósforo, evidenciando que a disponibilidade adequada desse nutriente foi determinante para o desempenho da forrageira. Além disso, o acúmulo de cálcio e magnésio também se correlacionou positivamente com a biomassa, sugerindo que a maior absorção desses cátions básicos ocorreu em função do maior desenvolvimento radicular proporcionado pela adubação fosfatada (NOVAIS *et al.*, 2007; TAIZ *et al.*, 2017).

As doses menores (0 e 50 mg kg<sup>-1</sup>) ficaram isoladas no diagrama canônico, evidenciando limitações nutricionais. Já a aplicação de estruvita apresentou desempenho equivalente às fontes solúveis (MAP e SSP), destacando-se por sua capacidade de fornecer fósforo de forma gradual, favorecendo o aproveitamento pelas raízes da braquiária ao longo do tempo (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

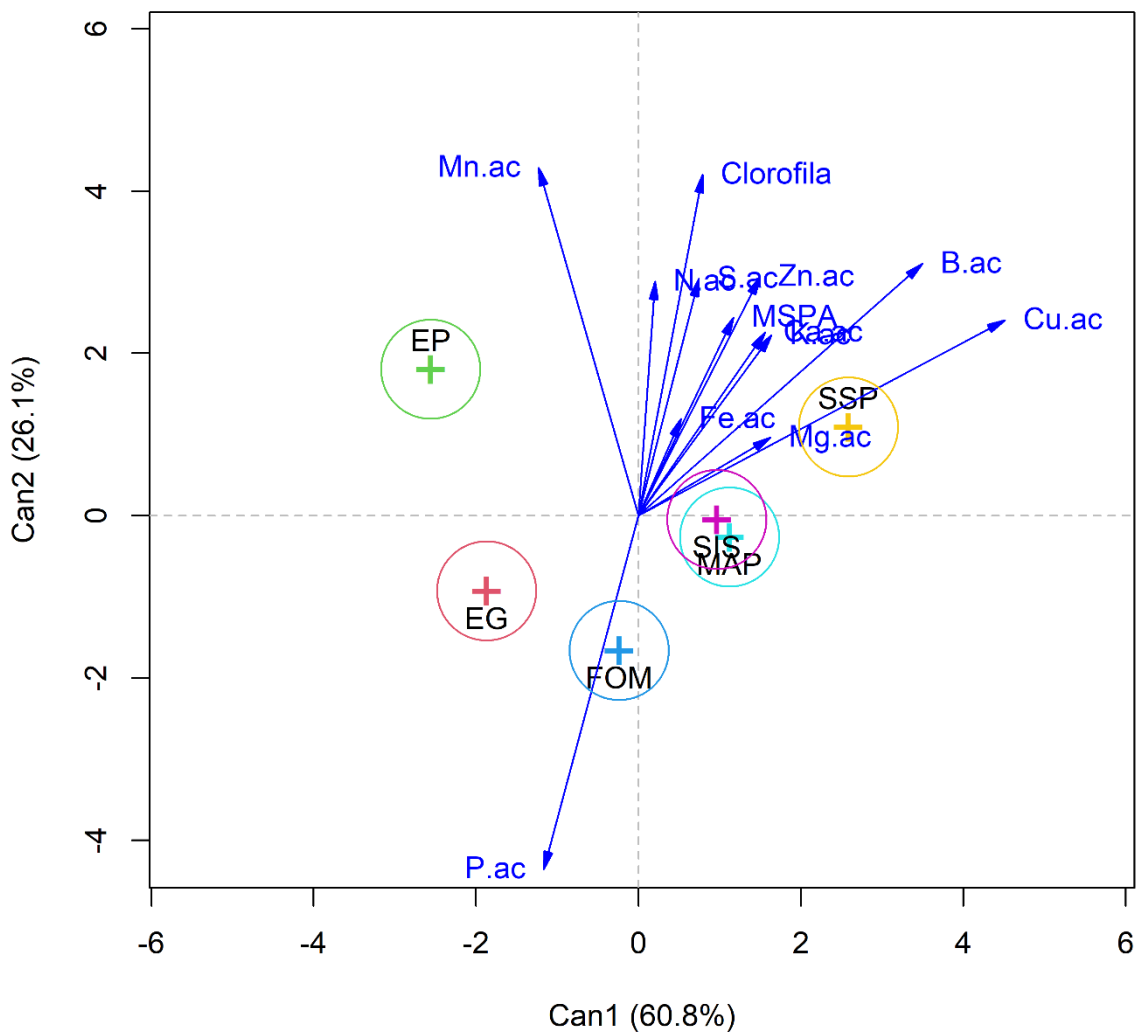


FIGURA 17 - Análise canônica para o cultivo da braquiária em função dos fertilizantes.

Assim, a análise canônica confirmou que a adubação fosfatada não apenas favoreceu o crescimento da braquiária, como também, otimizou sua capacidade de ciclagem de nutrientes, característica estratégica em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária.

#### 4.14 Análise canônica para os atributos químicos residuais no solo

A análise canônica aplicada aos atributos químicos do solo permitiu identificar a relação entre as diferentes doses de fósforo aplicadas (50, 100, 150 e 200 mg kg<sup>-1</sup>) e os parâmetros de fertilidade (Figura 18). Essa abordagem multivariada é essencial em estudos de fertilidade do solo, pois possibilita compreender de forma integrada, as correlações entre nutrientes e variáveis químicas, superando as limitações de análises univariadas (Ferreira, 2018; Cruz; Carneiro; Regazzi, 2012).

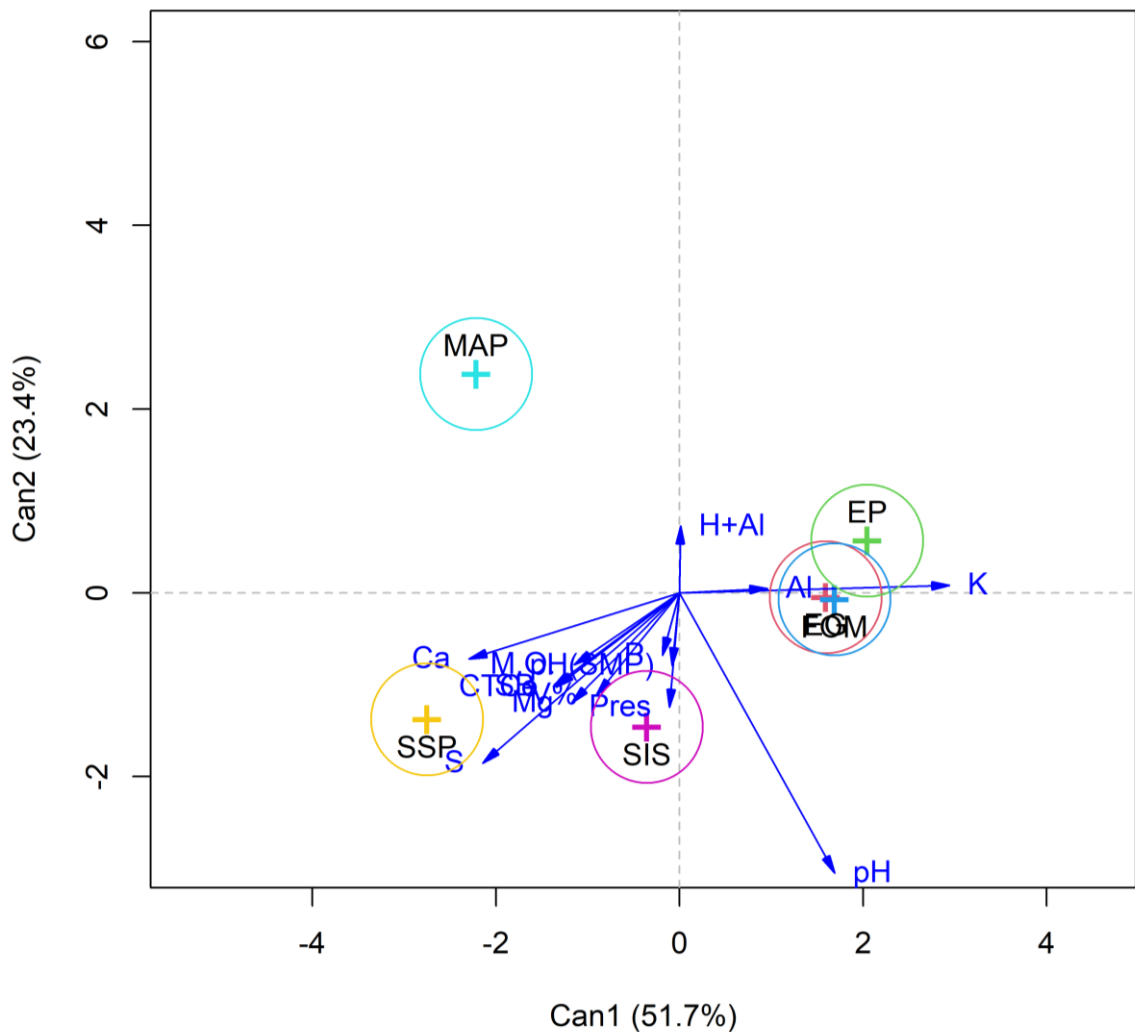


FIGURA 18 - Análise canônica para os atributos químicos residuais no solo em função dos fertilizantes.

Os resultados evidenciaram que as doses mais altas de P (150 e 200 mg kg<sup>-1</sup>) estiveram fortemente associadas ao incremento nos teores de fósforo disponíveis, cálcio trocável e saturação por bases (V%). Essa correlação positiva reflete o efeito da adubação fosfatada não apenas no aumento do P disponível, mas também, na melhoria do balanço químico do solo, favorecendo a absorção de cátions básicos pelas culturas (NOVAIS et al., 2007; SOUSA; LOBATO, 2004).

Por outro lado, as doses mais baixas de P (0 e 50 mg kg<sup>-1</sup>) ficaram isoladas no diagrama canônico, demonstrando maior associação com atributos relacionados à acidez potencial (H+Al) e ao alumínio trocável (Al<sup>3+</sup>), características típicas de solos de baixa fertilidade do Cerrado (Lopes; Guilherme, 2016). Esse padrão reforça a importância do manejo adequado da adubação fosfatada para superar as limitações químicas que restringem o desenvolvimento das culturas.

Outro aspecto observado foi associação positiva entre os tratamentos com estruvita e os atributos relacionados à manutenção do P disponível ao longo do tempo, em contraste com os fertilizantes solúveis (MAP e SSP), que apresentaram efeito mais imediato. Essa evidência confirma a eficiência da estruvita como fonte de liberação gradual de fósforo, contribuindo para a sustentabilidade do sistema produtivo (OLIVEIRA et al., 2019; CORDEIRO et al., 2020).

Dessa forma, a análise canônica do solo reforçou que a adubação fosfatada, especialmente via estruvita, não apenas incrementou os teores de fósforo, mas também, contribuiu para o equilíbrio químico geral, aspecto crucial, para a manutenção da produtividade em sistemas integrados e cultivos sequenciais.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos ao longo dos três cultivos (soja, milho e braquiária) indicaram que as fontes de fósforo, com liberação controlada, em especial a estruvita organomineral, apresentaram desempenho agrônomo consistente e compatível, com os princípios de manejo sustentável de nutrientes.

Na soja, em primeiro cultivo, as fontes de estruvita, tanto em pó ou granulada, favoreceram o crescimento das plantas, refletido em: maior altura, maior índice de clorofila e adequada produção de MSPA, indicando eficiência no suprimento de P. Ainda que o MAP tenha proporcionado, de forma geral, os melhores resultados em todas as variáveis e cultivos, a estruvita apresentou desempenho semelhante, em vários parâmetros, com destaque para o índice de clorofila, evidenciando seu potencial como fonte alternativa de fósforo. O fosfato de cálcio, por sua vez, mostrou-se menos eficiente na fase inicial, não conseguindo disponibilizar todo o P demandado pela soja aos 45 dias, o que reforça as limitações de fontes menos solúveis para culturas de ciclo mais curto quando avaliadas em estádios iniciais.

No milho, segundo cultivo, a estruvita organomineral (EOM) demonstrou elevada eficácia nas variáveis avaliadas, sugerindo que a combinação da estruvita com matriz orgânica contribuiu para reduzir a adsorção de P aos colóides do solo e prolongar sua disponibilidade.

Esse comportamento é coerente com o conceito de liberação gradual de fósforo, que, segundo Novais e Smyth (1999) e Rehman *et al.* (2022), tende a reduzir perdas por fixação e aumentar a eficiência de uso de P, em solos tropicais, com alta capacidade de fixação, como o solo utilizado neste ensaio.

No terceiro cultivo, com braquiária, aos 135 dias após aplicação dos fertilizantes, observou-se um cenário distinto, em que o fosfato de cálcio e o superfosfato simples foram as fontes, que proporcionaram os melhores resultados. Esse desempenho tardio do fosfato de cálcio indica que, embora menos eficiente para atender demandas imediatas de culturas anuais de ciclo curto, sua liberação mais lenta pode favorecer cultivos subsequentes ou de maior duração, contribuindo para o fornecimento residual de P ao sistema.

## 6 CONCLUSÕES

Em conjunto, os resultados indicam que:

A fonte solúvel de P, como o MAP ainda apresenta maior resposta imediata em termos de produtividade e atributos de crescimento.

A estruvita, especialmente na forma organomineral, mostra-se uma fonte promissora de P, capaz de fornecer fósforo de maneira mais gradual, com bom desempenho agrônômico em solos de alta fixação e maior potencial de uso, em sistemas de cultivo sequencial;

Fontes menos solúveis, como o fosfato de cálcio, podem ter papel relevante como reserva de P para cultivos posteriores, como evidenciado na braquiária.

Assim, a utilização de estruvita e de outras fontes recicladas de P se configura como estratégia viável para reduzir a dependência de fertilizantes fosfatados solúveis de origem mineral e importada, ao mesmo tempo, em que contribui para a reciclagem de nutrientes e para a redução de perdas ambientais. Esses resultados reforçam o potencial da estruvita como componente-chave em sistemas de manejo mais racionais e sustentáveis de fósforo em sucessões soja–milho–braquiária em solos tropicais.

Portanto, além do aspecto produtivo, esses dados reforçam o papel das fontes alternativas como ferramentas agrônômicas para maximizar a eficiência nutricional e otimizar o equilíbrio nutricional da planta, contribuindo para uma agricultura mais sustentável e tecnicamente eficiente.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. R. *et al.* Phosphorus fertilization enhances nodulation and nitrogen fixation in soybean. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 182, p. 625–633, 2019. Disponível em: <https://doi: 10.1021/acs.jafc.5c11100>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 10 fev. 2025.

BALBINOT JUNIOR, A. A. *et al.* Integração lavoura-pecuária no Brasil: fundamentos agronômicos e perspectivas. **Revista de Política Agrícola**, v. 29, n. 2, p. 68-83, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.52945/rac.v23i2.724>. Acesso em: 10 fev. 2025.

BATISTA, F. C. *et al.* Potencial de microrganismos rizosféricos e endofíticos de milho em solubilizar o fosfato de ferro e produzir sideróforos. Sete Lagoas: **Embrapa Milho e Sorgo**, 2018. 29 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 166). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1096969/1/bol1166.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2025.

BATTISTI, R. *et al.* Yield gap da soja no Brasil: magnitude, causas e possíveis soluções. In: **Circular Técnica CESB**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0016-0>. Acesso em 10 fev. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a **Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 3, 3 ago. 2010. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 10 fev. 2025.

CABEZA, R. A. *et al.* Long-term phosphorus availability from recycled fertilizers: evidence from multi-year field trials. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 363, p. 108592, 2024. Disponível em: <https://doi: 10.1007/s00248-023-02279-7>. Acesso em: 10 fev. 2025.

CABEZA, R. A.; MEYER, C.; OBERHOLZER, H. R. Struvite as a phosphorus fertilizer in tropical forage systems: residual effects and nutrient recovery. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 187, n. 2, p. 245-258, 2024. Disponível em: <https://doi: 10.36783/18069657rbcs20240127>. Acesso em: 10 fev. 2025.

CABEZA, R. A.; STEINGROBE, B.; RÖMER, W. Recycling of phosphorus fertilizers: agronomic efficiency and plant availability of recycled P fertilizers in soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 116, p. 245-262, 2020. Disponível em: <https://doi: 10.1007/s10705-019-10010-7>. Acesso em: 10 de fev. 2025.

CABEZA, R. A. *et al.* Phosphorus recovery and use from wastewater through struvite crystallization for agricultural fertilization. **Agricultural Systems**, v. 205, p. 103456, 2024. Disponível em: <https://doi: 10.1080/10643380701640573>. Acesso em: 10 de fev. 2025.

CALONEGO, J. C. *et al.* Soil compaction management and cover crops effects on soil properties and crop yield under no-tillage system. **Soil and Tillage Research**, v. 111, n. 2, p. 214-220, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2017.02.001>. Acesso em: 10 de fev. 2025.

CANTARELLA, H.; MARCELINO, R.; SOUZA, E. C. A. Nitrogênio no sistema solo-planta. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 5, p. 263-322, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/678e2840-20ed-42f2-82ea-8035a620401c/content>. Acesso em: 10 de fev. 2025.

CETEC – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Estruvita: fertilizante alternativo obtido a partir de resíduos**. Belo Horizonte: CETEC, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/221428/potencial-da-estruvita-como-fertilizante-de-liberacao-lenta-para-o-manejo-sustentavel-de-fosforo-na-agricultura-brasileira>. Acesso em: 10 de fev. 2025.

CHOI, J.; LEE, Y.; CHAN, C. Root growth under phosphorus deficiency: Revisiting the role of TOR signaling. **Journal of Experimental Botany**, v. 76, n. 1, p. 1–15, 2025. Disponível em: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/sevened2023.001-018+pt.br.pdf>. Acesso em :10 de fev. 2025.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Safra 2024/25 – 12º levantamento**. Brasília: Conab, v. 12, n. 12, set. 2025.

CONDÉ, V. C. *et al.* Phosphorus dynamics in soils and sustainable management alternatives. **Soil Use and Management**, v. 36, n. 1, p. 3-15, 2020. Disponível em: <http://doi:10.1016/j.crmicr.2024.100326>. Acesso em: 10 de fev. 2025.

CORDEIRO, M. R. C. *et al.* Efeito da estruvita na fertilidade do solo e no crescimento de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, e0190184, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20240127>. Acesso em: 10 fev. 2025.

CORDELL, D.; WHITE, S. Tracking phosphorus security: indicators of phosphorus vulnerability in the global food system. **Food Security**, v. 3, p. 419–433, 2014. Disponível em: <https://doi:10.1007/s12571-015-0442-0>. Acesso em: 10 fev. 2025.

CRUSCIOL, C. A. C. *et al.* Benefits of integrating crops and grass in rotation systems for soil quality and crop production. **Field Crops Research**, v. 137, p. 20-29, 2012. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/288942344\\_Benefits\\_of\\_integrating\\_crops\\_and\\_tropical\\_pastures\\_as\\_systems\\_of\\_production](https://www.researchgate.net/publication/288942344_Benefits_of_integrating_crops_and_tropical_pastures_as_systems_of_production). Acesso em: 10 fev. 2025

DE-BASTIANI, G. *et al.* Struvite as a slow-release fertilizer for tropical agriculture: opportunities and limitations. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 184, p. 639–651, 2021. Disponível em: <https://doi:10.1007/s11104-015-2747-3>. Acesso em: 10 fev. 2025

DE-BASHAN, L. E.; BASHAN, Y. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997–2003). **Water Research**, v. 38, p. 4222–4246, 2004. Disponível em: doi: <https://10.1016/j.watres.2004.07.014>. Acesso em: 10 fev. 2025

DEMEK, J. *et al.* Phosphorus recovery and recycling with struvite: agronomic potential and challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 289, p. 112512, 2021. Disponível em: doi: <https://10.1016/j.resconrec.2015.12.009>. Acesso em: 10 fev. 2025

DIAS, R. C. *et al.* Fosfatases na dinâmica do fósforo no solo sobre culturas de cobertura com espécies micorrízicas e não micorrízicas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.39, n.6, p.603-605, 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100>. Acesso em: 10 fev. 2025

EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de Produção de Soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2018.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. *Produção de milho*. Guaíba: Agropecuária, 2000.

FARIA, G. R. L. Fontes de fósforo aplicadas no sulco de plantio no desenvolvimento morfológico inicial de milho (*Zea mays* L.). **Revista FT**, v. 29, n. 129, p. 1-15, dez. 2025. Disponível em: <http://doi: 10.69849/revistaft/ra10202512091946>. Acesso em: 10 de fev. 2025.

FERREIRA, D. F. **Estatística experimental**. 3. ed. Lavras: UFLA, 2019.

FERREIRA, D. F. **Estatística multivariada**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2018.

GRANT, C. A.; FLATEN, D. N.; TOMARAS, J. K. The importance of phosphorus in the agricultural production system. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 81, p. 211-224, 2001. Disponível em: <https://brandteurope.com/en/the-importance-of-phosphorus-in-agriculture-essential-nutrients>. Acesso em: 10 fev. 2025.

HERMANN, L. *et al.* Sustainable phosphorus management in agriculture: new concepts for fertilizer recycling. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 115, p. 1–18, 2019. Disponível em: <https://doi: 10.1007/s44378-025-00039-2>. Acesso em: 10 fev. 2025.

KARIMI, S.; HAMZEH, N.; KARIMI, H. Struvite precipitation for nutrient recovery from wastewater: a review of environmental and economic aspects. **Journal of Environmental Management**, v. 289, p. 112–123, 2021. Disponível em: <https://doi: 10.1016/j.desal.2021.114949>. Acesso em :10 fev. 2025.

KATANDA, Y.; CANGAS, R.; MATTOS, W. *et al.* Agronomic efficiency of struvite compared to soluble phosphate fertilizers in tropical soils. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 6, p. 4752-4764, 2021. Disponível em: <https://doi: 10.1002/saj2.20065>. Acesso em: 10 fev. 2025.

KUMAR, R. *et al.* Sustainable phosphorus recovery from wastewater through struvite precipitation: Prospects and challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 247, p. 617-627, 2019. Disponível em: DOI: 10.1016/j.copbio.2012.08.001. Acesso em: 10 fev. 2025.

KUNZ, A.; PERDOMO, C. C.; BERTONCINI, E. I. Estruvita como fertilizante: potencial de uso e desafios. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 8, p. 565–573, 2020. Disponível em: <https://busca-de-projetos/-/projeto/221428/potencial-da-estruvita-como-fertilizante-de-liberacao-lenta-para-o-manejo-sustentavel-de-fosforo-na-agricultura-brasileira>. Acesso em: 10 fev. 2025.

LIU, Y. et al. Recovery of nitrogen and phosphorus by struvite crystallization from swine wastewater. **Desalination**, v. 277, p. 364–369, 2013. Disponível em: doi: 10.1016/j.desal.2011.04.056. Acesso em: 10 fev. 2025.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Interpretação de análise de solo: conceitos e aplicações. **Informações Agronômicas**, v. 155, p. 1-15, 2016. Disponível em: <https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-federal-de-mato-grosso/ciencia-do-solo-1/curso-03arquivo-01/72002773>. Acesso em: 10 fev. 2025.

MACHADO, C. G. *et al.* Chlorophyll index (SPAD) as an indicator of nitrogen status and productivity in maize. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, e0200062, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000500009>. Acesso em: 28 mai. 2025.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997.

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012.

MARTUSCELLO, J. A. *et al.* Produção de gramíneas forrageiras sob adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. 2, p. 261-269, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-35981999000500003>. Acesso em: 28 mai. 2025.

MENEZES-BLACKBURN, D. *et al.* Fertilizer value of recovered phosphorus from wastewater: agronomic performance and environmental risk. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 2, p. 1-14, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2128194>. Acesso em: 28 mai. 2025.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999.

NUNES, J. C. *et al.* Resposta do milho à adubação fosfatada em solos do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 599-609, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.14688/1984-3801/gst.v7n1p26-36>. Acesso em: 28 mai. 2025.

OLIVEIRA, G. C. *et al.* Eficácia agronômica da estruvita como fonte alternativa de fósforo para gramíneas forrageiras. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 49, e53678, 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.br/alice/bitstream/doc/1177655/1/Estruvita-como-fonte-de-fosforo-2025.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2025.

OLIVEIRA, J. P. *et al.* Effect of struvite on soil fertility and forage establishment in integrated crop-livestock systems. **Agronomy Journal**, v. 113, p. 4280–4292, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20240127>. Acesso em: 28 mai. 2025.

OLIVEIRA JÚNIOR, A. *et al.* Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados em sistemas de cultivo sucessivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, e0200042, 2020. <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/DkfKM7f4SMvfxdG9RytfF5j/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 fev. 2025

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova Iorque: ONU, 2015.

PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. Fosfatos solúveis e reativos na agricultura brasileira. **Informações Agronômicas**, n. 128, p. 1–12, 2010. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-13082012-101131/publico>. Acesso em: 28 mai. 2025.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022.

RAIJ, B. Van, *et al.* **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC, 2001.

RAIJ, B. Van. *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997.

RESENDE, A. V. *et al.* Efeito residual da adubação fosfatada em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 175–187, 2006. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/572251/1/doc195.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2025.

RESENDE, A. V. *et al.* Fertilidade do solo e manejo da adubação fosfatada em solos tropicais. **Informações Agronômicas**, n. 154, p. 1-17, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049>. Acesso em: 28 mai. 2025.

RESENDE, A. V. *et al.* **Disponibilidade de fósforo em solos tropicais: dinâmica, diagnóstico e manejo**. Embrapa Solos, Documentos 195, 2018.

REHMAN, M. Z. *et al.* Struvite as a sustainable phosphorus fertilizer: A review. **Agronomy**, v. 12, n. 3, p. 632, 2022. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1178785/1/Struvite-potential-as-a-slow-release.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2025.

RÖMER, W.; STEINGROBE, B. Fertilizers recovered from waste and residues. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 110, p. 143-158, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su10041166>. Acesso em: 28 mai. 2025.

ROY, E. D. *et al.* The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, v. 2, 16043, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.43>. Acesso em: 28 mai. 2025.

SANTOS, W. O. *et al.* Fertilizantes organominerais: potencialidades e desafios para a agricultura brasileira. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 37, n. 2, p. 1-19, 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1134679/1/cap14-livro-RecomendacaAINFO.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2025.

SANTOS, W. O. *et al.* Efeito residual da estruvita na disponibilidade de fósforo e produção agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, e0190187, 2020. Disponível em: <https://doi: 10.5039/agraria.v8i2a2016>. Acesso em: 28 mai. 2025.

SARTO, M. V. M. *et al.* Organomineral fertilizers based on struvite: efficiency and potential in agriculture. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 16, p. 2376-2389, 2021. Disponível em: <https://doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v26n4p306-312>. Acesso em: 28 mai. 2025.

SHU, L. *et al.* Recovery of phosphorus from digested wastewater sludge as struvite: impact of the process variables. **Water Research**, v. 40, p. 75–82, 2006. Disponível em: doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111743. Acesso em: 28 mai. 2025.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2009.

SILVA, F. C. *et al.* **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa, 2015.

SOARES FILHO, C. V. *et al.* Resposta de *Brachiaria brizantha* a doses de fósforo em solos de baixa fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1520-1529, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1808-1657001282012>. Acesso em: 28 mai. 2025.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2019.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos tropicais. Planaltina: **Embrapa Cerrados**, 2004.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação fosfatada em solos tropicais: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0210041, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982006000400002>. Acesso em: 28 mai. 2025.

SOUZA, R. A.; OLIVEIRA, G. C.; PULROLNIK, K. Manejo de forrageiras tropicais e sua contribuição para a ciclagem de nutrientes e sustentabilidade dos sistemas produtivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0200121, 2021. Disponível em: <https://scispace.com/pdf/ciclagem-de-nutrientes-em-ecossistemas-de-pastagens-55cqhrscxe.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2025.

TALBOYS, P. J. *et al.* Struvite: a slow-release fertiliser for sustainable phosphorus management? **Plant and Soil**, v. 401, n. 1, p. 109-123, 2016. Disponível em: <https://doi: 10.1007/s11104-015-2747-3>. Acesso em: 28 mai. 2025.

TAN, Z. *et al.* Fertilizer efficiency and residual effects of struvite in agricultural soils: a meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 314, p. 107–120, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39753-8>. Acesso em: 28 mai. 2025.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, v. 157, n. 3, p. 423–447, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>. Acesso em: 28 mai. 2025.

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011.

WANG, L. *et al.* Agronomic performance of recovered struvite as phosphorus fertilizer in maize cropping systems. *Field Crops Research*, v. 292, p. 108864, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01906-7>. Acesso em: 28 mai. 2025.

WANG, X.; SHI, L.; ZHANG, Y. *et al.* Long-term effectiveness of struvite as a phosphorus source for maize and wheat. *Field Crops Research*, v. 292, p. 108857, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/kPYHf4XVLJ4dyhpPMtKfK5m/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 28 mai. 2025.

WAHAB, A. *et al.* Enhancing phosphorus use efficiency in crop plants: Physiology, genetics, and breeding strategies. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 206, p. 108-125, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2005.01.004>. Acesso em: 28 mai. 2025.

WITHERS, P. J. A. *et al.* Fertilizer recycling from wastewater: technical opportunities and management challenges. *Journal of Environmental Quality*, v. 47, n. 6, p. 1232-1245, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1558889>. Acesso em: 28 mai. 2025.

WITHERS, P. J. A. *et al.* Recovering phosphorus to help close the food system phosphorus cycle. *Chemical Engineering Journal*, v. 337, p. 117–129, 2018. Disponível em: <https://scispace.com/pdf/phosphorus-recovery-and-recycling-closing-the-loop-3etkj7oa03.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2025.

WITHERS, P. J. A. *et al.* Stewardship to tackle global phosphorus inefficiency: the case of Europe. *Ambio*, v. 44, p. 193–206, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0614-8>. Acesso em: 28 mai. 2025.

ZHANG, H. *et al.* Phosphorus nutrition facilitates nitrogen assimilation through regulation of energy metabolism in crops. *Plant and Soil*, v. 423, p. 289-303, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa150>. Acesso em: 28 mai. 2025.

ZONTA, E. Curvas de resposta do milho à adubação potássica obtidas através de experimento fatorial. *Revista Agrária Acadêmica*, v.5, n.2, 2022 Disponível em: <https://doi.org/10.32406/v5n2/2022/35-49/agrariacad>. Acesso em: 28 mai. 2025.

## **ANEXOS**

TABELA 1 - Resumo da análise de variância da altura, índice de clorofila SPAD, produção de matéria seca da parte aérea (MSPA), acúmulo de nitrogênio (N ac.), fósforo (P ac.), potássio (K ac.), cálcio (Ca ac.), magnésio (Mg ac.), enxofre (S ac.), boro (B ac.), cobre (Cu ac.), manganês (Mn ac.) e zinco (Zn ac.) na parte aérea de plantas de soja em função da aplicação de diferentes fontes e doses de P

FV <sup>1/</sup>	GL <sup>2/</sup>	Altura	SPAD	MSPA	N ac.	P ac.	K ac.	Ca ac.	Mg ac.	S ac.	B ac.	Cu ac.	Mn ac	Zn ac.
Quadrado médio														
Fertilizante	5	251,3*	27,9*	85,6*	38838,1*	153,2*	18814,6*	11131,2*	2696,8*	244,6*	0,11*	0,003*	2,09*	0,02*
Dose	3	91,0*	16,3*	74,0*	35889,6*	329,6*	27654,8*	8105,5*	2388,7*	282,6*	0,08*	0,004*	1,46*	0,03*
Fert. x Dose	15	21,2	5,6	4,9	4097,2	11,02	695,2	632,6	139,9	21,5	0,00	0,000	0,23	0,01
Ad x Fatorial	1	952,2*	613,5*	115,7*	107934,6*	293,9*	38934,1*	19908,6*	5023,4*	482,1*	0,17*	0,007*	1,37*	0,12*
Residual	75	30,31	3,7	3,3	2559,9	12,7	1664,0	789,3	145,2	22,2	0,01	0,000	0,12	0,01
Informação adicional														
CV (%) <sup>3/</sup>		16,38	5,14	26,79	26,91	37,2	34,85	31,1	28,04	33,06	28,04	30,72	45,26	34,04
Média Fatorial		34,25	37,98	7,0	194,7	9,9	121,1	93,2	44,4	14,7	0,3	0,06	0,8	0,24
Média Adicional		21,37	25,34	1,5	27,0	1,2	20,4	24,0	8,2	3,5	0,09	0,01	0,2	0,06

<sup>1/</sup>: Fonte de variação; <sup>2/</sup> graus de liberdade; <sup>3/</sup>: coeficiente de variação.; \*: significante a 5% de probabilidade.

TABELA 2 - Resumo da análise de variância da altura, índice de clorofila SPAD, produção de matéria seca da parte aérea (MSPA), acúmulo de nitrogênio (N ac.), fósforo (P ac.), potássio (K ac.), cálcio (Ca ac.), magnésio (Mg ac.), enxofre (S ac.), boro (B ac.), cobre (Cu ac.), manganês (Mn ac.) e zinco (Zn ac.) na parte aérea de plantas de milho em função da aplicação de diferentes fontes (estruvita em pó, estruvita granulada, estruvita organomineral, fosfato de cálcio, superfosfato simples e fosfato monoamônico) e doses (50, 100, 150 e 200 mg dm<sup>-3</sup>) de P

FV <sup>1/</sup>	GL <sup>2/</sup>	Altura	SPAD	MSPA	N ac.	P ac.	K ac.	Ca ac.	Mg ac.	S ac.	B ac.	Fe ac.	Mn ac	Zn ac.
Quadrado médio														
Fertilizante	5		43,2*	33,9*	1621,5	110,5*	44636,5	603,3	210,1	13,5	0,02*	1,7*	0,04*	0,04*
Dose	3		55,3*	132,6*	7698,1*	273,6*	17760,2	113,9	928,5*	75,2*	0,02*	2,7*	0,12*	0,03*
Fert. x Dose	15		11,0	4,4	1091,5	12,1	21736,1	348,3	148,6	24,8	0,00	0,7	0,02	0,01
Ad x Fatorial	1		134,2*	304,7*	45125,4*	219,6*	380936,1*	1790,1*	5500,7*	874,1*	0,12*	2,7*	0,34*	0,15*
Residual	75		6,3	6,3	1128,1	10,0	26000,34	284,4	146,0	19,7	0,01	0,5	0,01	0,01
Informação adicional														
CV (%) <sup>3/</sup>			9,41	22,66	20,5	32,49	38,58	50,9	22,39	20,36	28,40	76,04	27,80	31,62
Média Fatorial			27,0	11,5	168,0	10,0	430,1	34,0	55,5	22,4	0,3	3,5	0,4	0,3
Média Adicional			21,1	2,6	59,5	2,5	115,5	31,0	18,3	7,3	0,1	1,2	0,1	0,1

<sup>1/</sup>: Fonte de variação; <sup>2/</sup> graus de liberdade; <sup>3/</sup>: coeficiente de variação.; \*: significante a 5% de probabilidade.

TABELA 3 - Resumo da análise de variância da altura, índice de clorofila SPAD, produção de matéria seca da parte aérea (MSPA), acúmulo de nitrogênio (N ac.), fósforo (P ac.), potássio (K ac.), cálcio (Ca ac.), magnésio (Mg ac.), enxofre (S ac.), boro (B ac.), cobre (Cu ac.), manganês (Mn ac.) e zinco (Zn ac.) na parte aérea de plantas de braquiária em função da aplicação de diferentes fontes e doses de P.

FV <sup>1/</sup>	GL <sup>2/</sup>	Altura	SPAD	MSPA	N ac.	P ac.	K ac.	Ca ac.	Mg ac.	S ac.	B ac.	Cu ac.	Mn ac.	Zn ac.
		Quadrado médio												
Fertilizante	5	17,1*	54,1*	1,13*	409,5	7,41*	1822,3*	17,9	21,3	9,3*	0,0036*	0,0008*	0,010*	0,0007*
Dose	3	2,8	463,9*	1,67*	1797,6*	25,3*	2875,0*	17,3	11,8	15,7*	0,0021*	0,0003*	0,007*	0,0010*
Fert. x Dose	15	12,3*	7,6	0,86*	204,8	1,3	1423,4*	11,6	17,9	3,6	0,0009*	0,0001*	0,002	0,0003
Ad x Fatorial	1	0,0	218,2*	4,70*	1114,1*	21,1*	11817,6*	192,8*	282,4*	41,8*	0,0095*	0,0012*	0,037*	0,0049*
Residual	75	411,0	15,7	0,39	215,9	1,5	678,1	9,6	10,8	2,8	0,0003	0,0000	0,002	0,0002
CV (%) <sup>3/</sup>		16,56	15,1	24,78	50,14	42,93	35,89	34,14	30,34	32,58	28,33	32,58	33,63	32,42
Média Fatorial		14,1	25,9	2,5	30,0	2,9	74,7	9,4	11,2	5,3	0,07	0,024	0,12	0,04
Média Adicional		14,1	33,5	1,4	13,0	0,6	19,3	2,3	2,6	2,0	0,02	0,006	0,03	0,01

<sup>1/</sup>: Fonte de variação; <sup>2/</sup> graus de liberdade; <sup>3/</sup>: coeficiente de variação.; \*: significante a 5% de probabilidade.

TABELA 4 - Equações de regressão obtidas pelo ajuste das variáveis resposta em função das doses de P obtidas no primeiro cultivo, com soja

Variável resposta	Modelo
MSPA	$y = 1,37 + 0,5209 \sqrt{x}$
Acúmulo de N	$y = 32,85 + 14,7812 \sqrt{x}$
Acúmulo de P	$y = 1,84 + 0,0634 \sqrt{x}$
Acúmulo de K	$y = 34,48 + 0,6647 \sqrt{x}$
Acúmulo de S	$y = 3,31 + 1,0528 \sqrt{x}$
Acúmulo de B	$y = 0,099 + 0,01926 \sqrt{x}$
Acúmulo de Ca	$y = 23,8 + 0,9167x - 0,0024x^2$
Acúmulo de Mg	$y = 8,35 + 3,3163 \sqrt{x}$
Acúmulo de Cu	$y = 0,0143 + 0,00394\sqrt{x}$
Acúmulo de Fe	$y = 6,71$
Acúmulo de Mn	$y = 0,26 + 0,00425 x$
Acúmulo de Zn	$y = 0,073 + 0,0151 \sqrt{x}$

TABELA 5 - Equações de regressão obtidas pelo ajuste das variáveis resposta em função das doses de P obtidas no segundo cultivo, com milho

Variável resposta	Modelo
MSPA	$y = 2,67 + 0,8064 \sqrt{x}$
Acúmulo de N	$y = 67,67 + 9,0456 \sqrt{x}$
Acúmulo de P	$y = 2,87 + 0,0563 x$
Acúmulo de K	$y = 115,55 + 5,6158x$ até $x = 58$
Acúmulo de S	$y = 8,98 \cdot 1,1991\sqrt{x}$
Acúmulo de B	$y = 0,089 + 0,01519 \sqrt{x}$
Acúmulo de Mg	$y = 20,73 + 3,1278 \sqrt{x}$
Acúmulo de Cu	$y = 0,0284 + 3,1278\sqrt{x}$
Acúmulo de Fe	$y = 0,155 + 0,0262 \sqrt{x}$
Acúmulo de Mn	$y = 0,155 + 0,0262 \sqrt{x}$
Acúmulo de Zn	$y = 0,128 + 0,01678 \sqrt{x}$

TABELA 6 - Equações de regressão obtidas pelo ajuste das variáveis resposta em função das doses de P obtidas no terceiro cultivo, com braquiária

Variável resposta	Modelo
MSPA	$y = 1.4 + 0,03x$ , se $x \leq 50$ $y = (1.4 + 0,03.50) - 0,004(x-50)$ se $x > 50$
Acúmulo de N	$y = 26,55$
Acúmulo de P	$y = 0,75 + 0,02x$
Acúmulo de K	$y = 19,3 + 1,40x$ , se $x \leq 50$ ; $y = (19,3 + 1,40.50) - 0,167(x-50)$ , se $x > 50$
Acúmulo de S	$y = 2,0 + 0,09$ , se $x \leq 50$ $y = (2,0 + 0,09.50) - 0,012(x-50)$ , se $x > 50$
Acúmulo de B	$y = 0,02 + 0,001x$ , se $x \leq 50$ $y = (0,02 + 0,001.50) - 0,0001(x-50)$ , se $x > 50$
Acúmulo de Ca	$y = 2,3 + 0,16$ , se $x \leq 50$ $y = (2,3 + 0,16.50) - 0,013(x-50)$ , se $x > 50$
Acúmulo de Mg	$y = 2,6 + 0,19x$ , se $x \leq 50$ $y = (2,6 + 0,19.50) - 0,011(x-50)$ se $x > 50$
Acúmulo de Cu	$y = 0,01 + 0,0004x$ , se $x \leq 50$ $y = (0,01 + 0,0004.50) - 0,0001(x-50)$ , se $x > 50$
Acúmulo de Fe	$y = 1,04$
Acúmulo de Mn	$y = 0,121$
Acúmulo de Zn	$y = 0,042$