

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO – IF GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

MANEJO DE ADUBAÇÃO FOSFATADA COM  
FERTILIZANTES DE EFICIÊNCIA AUMENTADA

Autora: Simone Hemkemeier Lourini  
Orientador: Prof. DSc. Aurélio Rubio Neto  
Coorientadores: Prof. DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues  
Prof. DSc. Thiago de Souza Celestrino

Rio Verde – GO  
Outubro – 2025

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO – IF GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

MANEJO DE ADUBAÇÃO FOSFATADA COM  
FERTILIZANTES DE EFICIÊNCIA AUMENTADA

Autora: Simone Hemkemeier Lourini  
Orientador: Prof. DSc. Aurélio Rubio Neto  
Coorientadores: Prof. DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues  
Prof. DSc. Thiago de Souza Celestrino

Tese apresentada como parte das exigências para obtenção do título de DOUTORA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração: Produção Vegetal Sustentável no Cerrado.

Rio Verde – GO  
Outubro – 2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano -  
SIBi**

Lourini, Simone Hemkemeier

L892m        Manejo de adubação fosfatada com fertilizantes de eficiência  
aumentada / Simone Hemkemeier Lourini. Rio Verde, 2025.

292f. il.

Orientador: Prof. Dr. Aurélio Rubio Neto. Coorientador:  
Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues.

Tese (Doutor) - Instituto Federal Goiano, curso de 0232014 -  
Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia - Rio Verde  
(Campus Rio Verde).

1. Fertilizantes fosfatados. 2. Aditivos agrícolas. 3.  
Fracionamento de fósforo. 4. Modelagem de equações  
estruturais. 5. Eficiência de uso do fósforo. I. Título.

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

### IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

<input checked="" type="checkbox"/> Tese (doutorado)	<input type="checkbox"/> Artigo científico
<input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado)	<input type="checkbox"/> Capítulo de livro
<input type="checkbox"/> Monografia (especialização)	<input type="checkbox"/> Livro
<input type="checkbox"/> TCC (graduação)	<input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento
<input type="checkbox"/> Produto técnico e educacional - Tipo:	<input type="text"/>
Nome completo do autor: Simone Hemkemeier Lourini	Matrícula: 2021102320140248
Título do trabalho: MANEJO DE ADUBAÇÃO FOSFATADA COM FERTILIZANTES DE EFICIÊNCIA AUMENTADA	

### RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano  /  /

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

### DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente  
 SIMONE HEMKEMEIER LOURINI  
Data: 02/12/2025 10:36:56-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rio Verde GO

Local

02 / 12 / 2025

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Documento assinado digitalmente  
 AURELIO RUBIO NETO  
Data: 04/12/2025 12:33:25-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 60/2025 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

## MANEJO DE ADUBAÇÃO FOSFATADA COM FERTILIZANTES DE EFICIÊNCIA AUMENTADA

Autora: Simone Hemkemeier Lourini

Orientador: Dr. Aurélio Rubio Neto

TITULAÇÃO: Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em 08 de outubro de 2025.

Prof. Dr. Aurélio Rubio Neto (Presidente)

Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues (Avaliador interno)

Prof<sup>a</sup>. Dra. June Faria Scherrer Menezes (Avaliadora externa)

Prof. Dr. Gustavo Castoldi (Avaliador interno)

Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira (Avaliador externo)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Aurelio Rubio Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 08/10/2025 17:54:03.
- **June Faria Scherrer Menezes, June Faria Scherrer Menezes - Professor Avaliador de Banca - Universidade de Rio Verde (01815216000178)**, em 09/10/2025 07:56:56.
- **Carlos Ribeiro Rodrigues, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 09/10/2025 12:11:33.
- **Gustavo Castoldi, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 10/10/2025 08:30:55.
- **Thiago Assis Rodrigues Nogueira, Thiago Assis Rodrigues Nogueira - Professor Avaliador de Banca - Universidade de São Paulo (63025530000104)**, em 19/10/2025 19:02:04.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 06/10/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

**Código Verificador:** 751458

**Código de Autenticação:** a51969c349



## AGRADECIMENTOS

Infinito agradecimento ao Grande Arquiteto do Universo e a todos os eventos no espaço e tempo em que me concedeu vida e consciência.

Agradeço ao meu esposo, pelo amor e apoio incondicional, apoio e companheirismo.

À minha família.

Ao Instituto Federal de Mato Grosso e ao Instituto Federal Goiano, pela parceria do doutorado interinstitucional.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do IF Goiano, Campus Rio Verde, pela oportunidade de qualificação, crescimento profissional e pessoal.

A todos os professores do PPGCA – Agronomia, pelos valiosos ensinamentos.

À equipe *Life Soil* e do Laboratório de Química Agrícola do IF Goiano, que participaram das insanas análises de fracionamento, em especial ao Lucas, José Wellington, João Ricardo, Humberto, Bruna, Tatiana, Julia, Tâmela, Rafael, Amanda, Josevaldo, Jeice, José Carlos e Prof. Carlos.

Ao meu orientador Professor DSc. Aurélio Rubio Neto, pela confiança e parceria.

Ao meu coorientador, Professor DSc. Thiago de Souza Celestrino, pela parceria.

E, em especial, ao meu coorientador Professor DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues, pela orientação, apoio, ensinamentos e parceria.

## BIOGRAFIA

SIMONE HEMKEMEIER LOURINI, 38 anos, natural de Alta Floresta, Mato Grosso. Filha de Alice Emília Hemkemeier e Anselmo Hemkemeier. Tem como irmãs Luciana e Carine. Esposa de Júnior Lourenço Lourini, com quem soma a vida a mais de 20 anos. Compõe o quadro de professores da área de agronomia, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso – IFMT, desde 2010, onde já atuou como coordenadora de cursos e, participa como membro de comissões, NDE e colegiados, além de projetos de ensino, pesquisa e extensão. Formada em Agronomia pela Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), em fevereiro de 2009. Possui especialização em Georreferenciamento de Imóveis Rurais (AJES) e mestrado em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos (UNEMAT), quando iniciou seus trabalhos com P, gerando o capítulo intitulado de “Recomendação de adubação fosfatada para pastagens” do livro “Nutrição e Adubação de Pastagens” (Caione; Prado, 2021) que recentemente foi publicado na “Springer” em uma versão atualizada “Phosphorus Nutrition in Tropical Pastures” no livro “Nutrition and fertilization of forage grasses” (Caione *et al.*, 2025). Em 2021, ingressou no curso de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia, no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, sob a orientação do Prof. DSc. Aurélio Rubio Neto. Por meio da disciplina de fertilidade do solo, teve contato com o Prof. DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues, que passou a ser seu coorientador, possibilitando a condução de experimentos envolvendo o P e aditivos para fertilizantes fosfatados, que levaram ao desenvolvimento desta tese. Pretende direcionar os conhecimentos adquiridos às futuras pesquisas na região Norte do Mato Grosso, onde atua como professora, principalmente no IFMT – Campus Alta Floresta, com universidades e instituições parceiras.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABELAS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	13
RESUMO GERAL .....	17
ABSTRACT.....	19
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	21
1.1 Dinâmica do P no solo e fatores que influenciam sua disponibilidade.....	22
1.2 Fertilizantes fosfatados e tecnologias de eficiência aumentada.....	29
1.3 Fracionamento químico do P nos solos .....	31
1.4 Modelagem de equações estruturais na dinâmica do P nos solos.....	35
Referências bibliográficas.....	39
2. OBJETIVOS .....	56
2.1 Objetivo geral .....	56
2.2 Objetivos específicos .....	56
3. CAPÍTULO I.....	58
<b>Resumo</b> .....	58
<b>Abstract</b> .....	58
3.1 Introdução .....	59
3.2 Material e Métodos .....	61
3.2.1 Determinação da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP).....	62
3.2.2 Delineamento experimental e manejo .....	64
3.2.3 Amostragem e fracionamento do fósforo .....	64
3.2.4 Análise estatística .....	66
3.3 Resultado e Discussão .....	67
3.4 Conclusão.....	88

4. CAPÍTULO II .....	106
<b>Resumo:</b> .....	106
<b>Abstract</b> .....	106
4.1 Introdução .....	107
4.2 Material e Métodos .....	108
4.2.1 Determinação da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)...	110
4.2.2 Delineamento experimental e manejo .....	112
4.2.3 Amostragem e fracionamento do fósforo .....	112
4.2.4 Análise estatística .....	114
4.3 Resultado e Discussão .....	114
4.4 Conclusão.....	144
5. CAPÍTULO III.....	162
<b>Resumo:</b> .....	162
<b>Abstract:</b> .....	162
5.1 Introdução .....	163
5.2 Material e Métodos .....	164
5.2.1 Determinação da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)...	166
5.2.2 Delineamento experimental e manejo .....	168
5.2.3 Amostragem e fracionamento do fósforo .....	168
5.2.4 Análise estatística .....	170
5.3 Resultado e Discussão .....	170
5.4 Conclusão.....	198
6. CAPÍTULO IV .....	216
<b>Resumo:</b> .....	216
<b>Abstract</b> .....	216
6.1 Introdução .....	217
6.2 Material e Métodos .....	218
6.3 Resultado e Discussão .....	222
6.3.1 Agrupamento dos tratamentos .....	222
6.3.2 Modelagem de equações estruturais .....	228
6.4 Conclusão.....	242
7. CAPÍTULO V .....	266

<b>ABSTRACT</b> .....	266
<b>7.1 INTRODUCTION</b> .....	268
<b>7.2 MATERIALS AND METHODS</b> .....	269
<b>7.2.1 Experimental site and soil characterization</b> .....	269
<b>7.2.2 Soybean Experiment</b> .....	269
7.2.3 Maize Experiment .....	272
7.2.4 Statistical Analysis .....	274
<b>7.3 RESULTS AND DISCUSSION</b> .....	274
7.3.1 Soybean Experiment.....	274
7.3.2 Maize Experiment .....	276
7.3.3 Comparative Synthesis: Soybean vs. Maize.....	277
<b>7.4 CONCLUSIONS</b> .....	278
<b>8. CONCLUSÃO GERAL</b> .....	291

## ÍNDICE DE TABELAS

### 3. CAPÍTULO I

**Tabela 1.** Caracterização granulométrica e mineralógica dos horizontes superficiais do Latossolo Vermelho Amarelo acriférico (LVAwf)<sup>1</sup> ..... 61

**Tabela 2.** Caracterização química das subamostras dos solos Latossolo Vermelho Amarelo acriférico (LVAwf)..... 67

**Tabela 3.** Análise de variância das frações de P no Latossolo Vermelho Amarelo acriférico (LVAwf) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). ..... 69

**Tabela 4.** Coeficientes de correlação (r) entre o Po-mic e as frações de P orgânico lábil (Po-Lábil), moderadamente lábil (Po-MLábil) e não lábil (Po-NLábil) e os teores médios de P em cada fração orgânica em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférico (LVAwf) incubado com MAP e ST com e sem aditivos por 30, 90, 180, 270 e 360 dias. .... 81

### 4. CAPÍTULO II

**Tabela 1.** Caracterização granulométrica e mineralógica dos horizontes superficiais do Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe)<sup>1</sup>. ..... 109

**Tabela 2.** Caracterização química das subamostras dos solos Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe)..... 110

**Tabela 3.** Análise de variância das frações de P no Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI)..... 116

**Tabela 4.** Coeficientes de correlação (r) entre o Po-mic e as frações de P orgânico lábil (Po-Lábil), moderadamente lábil (Po-MLábil) e não lábil (Po-NLábil) e os teores médios de P em cada fração orgânica em um Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe) incubado com MAP e ST com e sem aditivos por 30, 90, 180, 270 e 360 dias. .... 130

### 5. CAPÍTULO III

**Tabela 1.** Caracterização granulométrica e mineralógica dos horizontes superficiais do Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo)<sup>1</sup> ..... 165

**Tabela 2.** Caracterização química das subamostras dos solos Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo)..... 166

**Tabela 3.** Análise de variância das frações de P no Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). ..... 173

**Tabela 4:** Coeficientes de correlação entre as frações inorgânicas e orgânicas de fósforo em um Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) incubado com MAP e ST com e sem aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 DAI..... 177

## 6. CAPÍTULO IV

**Tabela 1.** Valores médios ( $\bar{x}$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) das frações de P em um Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) obtidas pelo fracionamento sequencial de Hedley (P inorgânico em solução – Pi.sol; P inorgânico lábil – Pi.Lábil; P orgânico lábil – Po.Lábil; P inorgânico precipitado com Fe e Al – Pi.Fe+Al; P orgânico moderadamente lábil – Pi.Mlábil; P inorgânico não lábil – Pi.Nlábil; P orgânico não lábil – Po.Nlábil; P inorgânico precipitado com Ca – Pi.Ca; P inorgânico ocluso – Pi.ocluso e P orgânico microbiano – Po.mic), aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação com fontes fosfatadas (MAP e ST) e aditivos (KimcoatBioHP<sup>®</sup>, IFCoat e sem aditivo). ..... 225

**Tabela 2.** Valores médios ( $\bar{x}$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) das frações de P em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférico (LVAwf) obtidas pelo fracionamento sequencial de Hedley (P inorgânico em solução – Pi.sol; P inorgânico lábil – Pi.Lábil; P orgânico lábil – Po.Lábil; P inorgânico precipitado com Fe e Al – Pi.Fe+Al; P orgânico moderadamente lábil – Pi.Mlábil; P inorgânico não lábil – Pi.Nlábil; P orgânico não lábil – Po.Nlábil; P inorgânico precipitado com Ca – Pi.Ca; P inorgânico ocluso – Pi.ocluso e P orgânico microbiano – Po.mic), aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação com fontes fosfatadas (MAP e ST) e aditivos (KimcoatBioHP<sup>®</sup>, IFCoat e sem aditivo). ..... 226

**Tabela 3.** Valores médios ( $\bar{x}$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) das frações de P em um Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe) obtidas pelo fracionamento sequencial de Hedley (P inorgânico em solução – Pi.sol; P inorgânico lábil – Pi.Lábil; P orgânico lábil – Po.Lábil; P inorgânico precipitado com Fe e Al – Pi.Fe+Al; P orgânico moderadamente lábil – Pi.Mlábil; P inorgânico não lábil – Pi.Nlábil; P orgânico não lábil – Po.Nlábil; P inorgânico precipitado com Ca – Pi.Ca; P inorgânico ocluso – Pi.ocluso e P orgânico microbiano – Po.mic), aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação com fontes fosfatadas (MAP e ST) e aditivos (KimcoatBioHP<sup>®</sup>, IFCoat e sem aditivo). ..... 227

**Tabela 4.** Análise de normalidade multivariada (teste de Mardia Skewness e Mardia Kuryosis) para os conjuntos de dados no Neossolo Quartzarênico Órtico típico (RQo), Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe) e Latossolo Vermelho Amarelo acriférico (LVAwf). ..... 228

## ÍNDICE DE FIGURAS

### INTRODUÇÃO GERAL

**Figura 1.** Formas de fósforo no sistema solo-planta: 1.Absorção ou influxo; 2.Efluxo ou extrusão, 3.Deposição de fosfatos de baixo peso molecular, 4.Deposição de matéria orgânica, 5.Mineralização lenta por microrganismos heterotróficos, 6.Imobilização na biomassa microbiana, 7.Mineralização rápida por microrganismos heterotróficos, 8.Perdas, 9.Intemperismo (lento), 10.Precipitação ou fixação, 11.Adsorção, 12.Dessorção, 13.Solubilização de fertilizantes minerais, 14.Retrogradação. Adaptado de Havlin, (2017) e Novais; Smyth; Nunes, (2007). ..... 24

**Figura 2.** Esquema do fracionamento do fósforo no solo de acordo com o método (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982) com modificações e correlação das frações com as formas do fósforo no solo (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013). Fonte: Adaptado de (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013). ..... 34

**Figura 3.** Modelo C2, modelo de equações estruturais para o ciclo do P no solo. Todas as variáveis medidas (em caixas) são descritas como efeito indicadores associados a variáveis latentes (em círculos). Os números indicam os parâmetros padronizados estimados ( $P < 0.001$ ) enquanto os valores do  $R^2$  (números em negrito). indicam a variância explicada para cada variável mensurada. Os símbolos ° e \*\* representam significância estatística a níveis de  $P < 0,1$  e  $0,01$  respectivamente. As variáveis de erro (e1–e6, d8, f1–f3) são valores padronizados. Modelo  $X^2 = 7.02$ ,  $df = 7$ ,  $P = 0,427$  (Fonte: Adaptado de Sales (2015). ..... 38

### 3. CAPÍTULO I

**Figura 1.** Representação gráfica da forma linear da isoterma de Langmuir, das equações hiperbólicas e dos valores estimados da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP,  $\text{mg P g}^{-1}$  de solo) para o Neossolo Quartzarênico Órtico típico (RQo), Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe) e Latossolo Vermelho Amarelo acriférico (LVAwf). ..... 63

**Figura 2.** Esquema do fracionamento do fósforo no solo de acordo com o método (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982) com modificações e correlação das frações com as formas do fósforo no solo (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013). Fonte: Adaptado de (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013). ..... 66

**Figura 3.** Frações de fósforo em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférico (LVAwf) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). Fósforo inorgânico em solução (Pi-solução), fósforo inorgânico lábil (Pi-Lábil) e fósforo inorgânico não lábil (Pi-NLábil), em  $\text{mg kg}^{-1}$ . ..... 72

**Figura 4.** Frações de fósforo em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). Fósforo inorgânico ocluso (Pi-ocluso), fósforo inorgânico precipitado com  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  livres em solução (Pi-Fe+Al) e fósforo inorgânico precipitado com  $\text{Ca}^{2+}$  (Pi-Ca), em  $\text{mg kg}^{-1}$ . ..... 74

**Figura 5.** Frações de fósforo em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após a incubação (DAI). Fósforo orgânico lábil (Po-lábil), fósforo microbiano (Po-mic) e fósforo orgânico moderadamente lábil (Po-MLábil), em  $\text{mg kg}^{-1}$ . ..... 77

**Figura 6.** Relação entre os valores médios de Po-mic com Pi-solução (A) e Pi-Fe+Al (B) em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf) dos 30 aos 360 dias de incubação com MAP, ST com e sem tratamento com aditivos. .... 82

#### 4. CAPÍTULO II

**Figura 1.** Representação gráfica da forma linear da isoterma de Langmuir, das equações hiperbólicas e dos valores estimados da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP,  $\text{mg P g}^{-1}$  de solo) para o Neossolo Quartzarênico Órtico típico (RQo), Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe) e Latossolo Vermelho-Amarelo acriférrico (LVAwf). ..... 111

**Figura 2.** Esquema do fracionamento do fósforo no solo de acordo com o método (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982) com modificações e correlação das frações com as formas do fósforo no solo (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013). Fonte: Adaptado de (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013). ..... 113

**Figura 3.** Frações de fósforo em um Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). Fósforo inorgânico em solução (Pi-solução), fósforo inorgânico lábil (Pi-Lábil) e fósforo inorgânico não lábil (Pi-NLábil), em  $\text{mg kg}^{-1}$ . ..... 119

**Figura 4.** Frações de fósforo em um Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). Fósforo inorgânico ocluso (Pi-ocluso), fósforo inorgânico precipitado com  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  livres em solução (Pi-Fe+Al) e fósforo inorgânico precipitado com  $\text{Ca}^{2+}$  (Pi-Ca), em  $\text{mg kg}^{-1}$ ... 121

**Figura 5.** Frações de fósforo em um Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após a incubação (DAI). Fósforo orgânico lábil (Po-lábil), fósforo microbiano (Po-mic) e fósforo orgânico moderadamente lábil (Po-MLábil), em  $\text{mg kg}^{-1}$ . ..... 123

**Figura 6.** Relação entre os valores médios de Po-mic com Pi-solução (A), com Pi-Fe+Al (B) e com Pi-ocluso (C) em um Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe) dos 30 aos 360 dias de incubação com MAP, ST com e sem tratamento com aditivos. .... 132

#### 5. CAPÍTULO III

**Figura 1.** Representação gráfica da forma linear da isoterma de Langmuir, das equações hiperbólicas e dos valores estimados da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP,  $\text{mg P g}^{-1}$  de solo) para o Neossolo Quartzarênico Órtico típico (RQo), Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe) e Latossolo Vermelho-Amarelo acriférrico (LVAwf). ..... 167

**Figura 2.** Esquema do fracionamento do fósforo no solo de acordo com o método (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982) com modificações e correlação das frações com as

formas do fósforo no solo (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013). Fonte: Adaptado de (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013). ..... 170

**Figura 3.** Frações de fósforo em um Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). Fósforo inorgânico em solução (Pi-solução), fósforo inorgânico lábil (Pi-Lábil) e fósforo inorgânico não lábil (Pi-NLábil), em  $\text{mg kg}^{-1}$  ..... 175

**Figura 4.** Frações de fósforo em um Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). Fósforo inorgânico ocluso (Pi-occluso), fósforo inorgânico precipitado com  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  livres em solução (Pi-Fe+Al) e fósforo inorgânico precipitado com  $\text{Ca}^{2+}$  (Pi-Ca), em  $\text{mg kg}^{-1}$  ..... 178

**Figura 5.** Frações de fósforo em um Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após a incubação (DAI). Fósforo orgânico lábil (Po-lábil), fósforo microbiano (Po-mic) e fósforo orgânico moderadamente lábil (Po-MLábil), em  $\text{mg kg}^{-1}$ . ..... 180

**Figura 6.** Relação entre os valores médios de Po-mic com Pi-solução (A) e com Pi-Fe+Al (B) em um Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) dos 30 aos 360 dias de incubação com MAP, ST com e sem tratamento com aditivos. .... 181

## 6. CAPÍTULO IV

**Figura 1.** Autovalores (A) e variância acumulado (B) dos dados na análise de agrupamento por cluster ..... 221

**Figura 2.** Modelo de equação sequencial básico da dinâmica de fósforo no solo com base nas frações de P no solo obtido pelo método da extração sequencial de Hedley adaptada de Gama-Rodrigues *et al.* (2014) para os dados obtidos. P inorgânico em solução (Pi-solução); P orgânico lábil (Po-Lábil), moderadamente (Po-MLábil) e não lábil (Po-NLábil); P inorgânico lábil (Pi-Lábil), precipitado com Fe e Al, (Pi-Fe +Al) e não lábil (Pi-NLábil); P inorgânico precipitado com Ca (Pi-Ca) e P inorgânico ocluso (Pi-occluso). ..... 222

**Figura 3.** Agrupamento hierárquico em componentes principais de tratamentos com fontes de fósforo inorgânico (monoamônio fosfato – MAP e superfosfato triplo – ST), com e sem os aditivos IFCoat e KimcoatBioHP®, além do tratamento sem adubação fosfatada (Controle), em função das frações de P nos solos: Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) (A), Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf) (B) e Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe) (C). As frações de P foram obtidas pelo método de Hedley: P inorgânico em solução (Pi-solução), P inorgânico lábil (Pi-lábil), P orgânico lábil (Po-lábil), P inorgânico associado a Fe e Al (Pi-Fe+Al), P orgânico moderadamente lábil (Po-MLábil), P inorgânico não lábil (Pi-NLábil), P orgânico não lábil (Po-NLábil), P inorgânico precipitado com Ca (Pi-Ca), P inorgânico ocluso (Pi-occluso) e P orgânico microbiano (Po-mic), avaliados aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias de incubação. .... 223

**Figura 4.** Modelos completos de equações estruturais (SEM) ajustados às frações de fósforo em Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) ao longo de 360 dias de incubação, organizados em quatro agrupamentos de tratamentos (painéis A–D): (A) Controle; (B) monoamônio fosfato (MAP), superfosfato triplo recoberto com KimcoatBioHP® (ST|Kim) e com IFCoat (ST|IF); (C) monoamônio fosfato recoberto com IFCoat (MAP|IF); (D) superfosfato triplo (ST), monoamônio fosfato recoberto com

KimcoatBioHP® (MAP|Kim). Para cada agrupamento, apresentam-se os diagramas estruturais completos e os respectivos índices globais de ajuste ( $\chi^2/df$ , CFI, TLI, RMSEA, SRMR, AIC e BIC). \*\* e \* = significativo a 1 e 5% pelo teste de F, respectivamente... 230

**Figura 5.** Modelos completos de equações estruturais (SEM) ajustados às frações de fósforo em Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf) ao longo de 360 dias de incubação, organizados em quatro agrupamentos de tratamentos (painéis A–D): (A) Controle; (B) superfosfato triplo recoberto com KimcoatBioHP® (ST|Kim); (C) monoamônio fosfato recoberto com IFCoat (MAP|IF); (D) monoamônio fosfato (MAP), superfosfato triplo (ST), monoamônio fosfato recoberto com KimcoatBioHP® (MAP|Kim) e superfosfato triplo recoberto com IFCoat (ST|IF). Para cada agrupamento, apresentam-se os diagramas estruturais completos e os respectivos índices globais de ajuste ( $\chi^2/df$ , CFI, TLI, RMSEA, SRMR, AIC e BIC). \*\* e \* = significativo a 1 e 5% pelo teste de F, respectivamente. .... 234

**Figura 6.** Modelos completos de equações estruturais (SEM) ajustados às frações de fósforo em Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe) ao longo de 360 dias de incubação, organizados em quatro agrupamentos de tratamentos (painéis A–D): (A) Controle; (B) superfosfato triplo (ST); (C) superfosfato triplo recoberto com KimcoatBioHP® (ST|Kim) e com IFCoat (ST|IF); (D) monoamônio fosfato (MAP), monoamônio fosfato recoberto com KimcoatBioHP® (MAP|Kim) e com IFCoat (MAP|IF). Para cada agrupamento, apresentam-se os diagramas estruturais completos e os respectivos índices globais de ajuste ( $\chi^2/df$ , CFI, TLI, RMSEA, SRMR, AIC e BIC). \*\* e \* = significativo a 1 e 5% pelo teste de F, respectivamente. .... 239

## 7. CAPÍTULO V

**Figure 1.** Available soil phosphorus (P) determined by Mehlich I (P-MI) (A) and Mehlich III (P-MIII) (B) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), 15 days after sowing and fertilizer application, in samples collected from 0–0.1 m depth as a function of PhytohumusBio® doses applied with MAP under broadcast and row placement. Rio Verde, GO, Brazil, 2021. Means followed by the same uppercase letter do not differ between application methods (Broadcast vs. Row) according to Tukey's test ( $p \leq 0.15$ ). .... 284

**Figure 2.** Plant height (PH, cm) (A), stem diameter (SD, mm) (B), number of pods per plant (NP, pods plant<sup>-1</sup>) (C), thousand grain weight (TGW, g) (D), grain yield (GY, kg ha<sup>-1</sup>) (E), agronomic efficiency (AE, %) (F), and phosphorus use efficiency (PUE, kg kg<sup>-1</sup>) (G) of soybean cultivar CZ48B32IPRO RR2 Credezz® as affected by PhytohumusBio® doses applied with MAP under broadcast and row placement. Rio Verde, GO, Brazil, 2021. Means followed by the same uppercase letter do not differ between application methods according to Tukey's test ( $p \leq 0.15$ ). .... 284

**Figure 3.** Early maize growth (cv. NK555 VIP3) at 20 days after sowing under different P sources and doses: shoot dry mass (SDM, g plant<sup>-1</sup>) and root dry mass (RDM, g plant<sup>-1</sup>). Values above each column represent total dry mass (TDM, g plant<sup>-1</sup>). Means followed by different letters differ significantly according to Tukey's test ( $p \leq 0.05$ ). \*\*, \*, and ns indicate significance at 1%, 5%, and non-significance, respectively, according to the F-test comparing treatments and control. .... 285

**Figure 4.** Maize biometric parameters at harvest: stover dry mass (Stover, kg ha<sup>-1</sup>) (A), grain rows per ear (Rows ear<sup>-1</sup>) (B), grains per row (Grains row<sup>-1</sup>) (C), grain yield (GY, kg ha<sup>-1</sup>) (D), agronomic efficiency (AE, %) (E), and phosphorus use efficiency (PUE, kg kg<sup>-1</sup>) (F) under different P sources and doses in the 2021 second season, Rio Verde, GO, Brazil. Means followed by different letters differ significantly according to Tukey's test

( $p \leq 0.05$ ). \*\*, \*, and ns indicate significance at 1%, 5%, and non-significance, respectively, according to the F-test comparing treatments and control. .... 285

**Figure 5.** Leaf phosphorus concentration (Leaf P,  $\text{g kg}^{-1}$ ) (A) and phosphorus accumulation in stover (P stover,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) (B) of maize plants fertilized with different P sources and doses ( $\text{kg ha}^{-1} \text{P}_2\text{O}_5$ ) in the 2021 second season; simplified phosphorus balance in the cropping system (P balance,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) (C, D). Rio Verde, GO, Brazil. Means followed by different letters differ significantly according to Tukey's test ( $p \leq 0.05$ ). \*\*, \*, and ns indicate significance at 1%, 5%, and non-significance, respectively, according to the F-test comparing treatments and control. .... 286

**Figure S1.** Leaf nutrient concentrations (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Fe, Mn, Zn) of soybean cultivar CZ48B32IPRO RR2 Credenz<sup>®</sup> (BASF) at the R1–R2 stage, as affected by Phytohumus Bio<sup>®</sup> doses combined with MAP applied either by broadcasting or in rows, 2020/2021 season. Means followed by different letters differ significantly according to Tukey's test at 5% probability. \*\*, \*, and ns indicate significance at 1% and 5%, and non-significance, respectively, according to the F-test comparing treatments and control. 287

**Figure S2.** Non-destructive pigment indices obtained with Dualex<sup>®</sup>, SPAD<sup>®</sup>, and Clorofilog<sup>®</sup> sensors in second-season maize (cv. NK555 VIP3) under different P sources and rates: flavonoids (Flav-Dualex) (A), anthocyanins (Anth-Dualex) (B), chlorophyll content (Chl-SPAD) (C), chlorophyll a (ChlA-Clorofilog) (D), and chlorophyll b (ChlB-Clorofilog) (E). Means followed by different letters differ significantly according to Tukey's test at 5% probability. \*\*, \*, and ns indicate significance at 1% and 5%, and non-significance, respectively, according to the F-test comparing treatments and control. 288

**Figure S3.** Chlorophyll a fluorescence parameters measured with Fluorpen Max 100 in second-season maize (cv. NK555 VIP3) as affected by P sources and rates: net closure rate of PSII reaction centers (Mo) (A), maximum quantum efficiency of PSII ( $\Phi\text{Po}$ ) and energy dissipation as heat ( $\Phi\text{Do}$ ) (B), absorbed photon flux by antenna complexes (ABS/RC) (C), trapped energy flux per reaction center (TRo/RC) (D), electron transport flux (ETo/RC) (E), dissipated energy flux as heat (DIo/RC) (F), and overall PSII performance index ( $\Pi\text{ABS}$ ) (G). Means followed by different letters differ significantly according to Tukey's test at 5% probability. \*\*, \*, and ns indicate significance at 1% and 5%, and non-significance, respectively, according to the F-test comparing treatments and control. .... 289

**Figure S4.** Weather conditions during the maize experiment (second season 2021) in Rio Verde, Goiás: maximum and minimum air temperature, rainfall, and irrigation throughout the crop cycle. .... 290

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

<b>Símbolos, fórmulas e íons</b>	<b>Significado</b>
P	fósforo (elemento químico)
Po	fósforo orgânico
Pi	fósforo inorgânico
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	ácido fosfórico
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	dihidrogenofosfato (ânion)
HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	hidrogenofosfato (ânion)
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	fosfato (ânion)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	amônio (cátion)
Ca <sup>2+</sup>	cálcio (cátion)
Fe	ferro (elemento)
Al	alumínio (elemento)
AlPO <sub>4</sub>	aluminofosfato
Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	fosfato monocálcico
CaHPO <sub>4</sub>	fosfato bicálcico
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	fosfato monoamônico (MAP)
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	ácido sulfúrico
HCl	ácido clorídrico
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	peróxido de hidrogênio
NaHCO <sub>3</sub>	bicarbonato de sódio
NaOH	hidróxido de sódio
<b>Frações de P (Hedley e pools)</b>	<b>Significado</b>
Pi-solução	fósforo inorgânico em solução
Pi-Lábil	fósforo inorgânico lábil (NaHCO <sub>3</sub> )
Pi-Fe+Al	Pi ligado a óxidos/hidróxidos de Fe e Al (NaOH)
Pi-Ca	Pi associado a fosfatos de cálcio (HCl)
Pi-NLábil	Pi não lábil (NaOH forte / residual)
Pi-ocluso	Pi ocluso (fração residual)
Po-Lábil	fósforo orgânico lábil (NaHCO <sub>3</sub> )
Po-MLábil	fósforo orgânico moderadamente lábil (NaOH)
Po-NLábil	fósforo orgânico não lábil (NaOH forte / residual)
Po-mic	fósforo orgânico microbiano
P-residual	fósforo residual (Pi + Po não lábeis)
RTA	resina trocadora de ânions (extração de Pi disponível)
Pools de P	conjuntos latentes: Orgânico, Inorgânico, Mineral (primário/Ca), Ocluso, Disponível

<b>Fertilizantes, aditivos e produtos</b>	<b>Significado</b>
MAP	monoamônio fosfato ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ )
SS	superfosfato simples
ST	superfosfato triplo
FR	fosfatos reativos (rochas fosfatadas reativas)
IF / IFCoat	inibidor de fixação / revestimento teste
KimcoatBioHP <sup>®</sup>	revestimento polimérico/quelatzado (Kimberlit)
PhytohumusBio <sup>®</sup>	biofertilizante/ácidos húmicos
BiomaPhos <sup>®</sup>	inoculante microbiano (Embrapa)
<b>Classes de solo</b>	<b>Significado</b>
LVAwf	Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico
RQo	Neossolo Quartzarênico órtico típico
NVe	Nitossolo Vermelho eutrófico típico
LVd	Latossolo Vermelho distrófico (exemplo citado)
<b>Conceitos edáficos, de disponibilidade e de manejo em campo</b>	<b>Significado</b>
pH	potencial hidrogeniônico
I	fator intensidade (P na solução)
Q	fator quantidade (P adsorvido/armazenado)
C	fator capacidade (poder tampão)
FCP	fator capacidade de fósforo (poder tampão de P)
SRP	<i>soluble reactive phosphorus</i> (fósforo reativo solúvel)
MSP	microrganismos solubilizadores de fosfato
$\Delta\text{pH}$	diferença entre pH em KCl e pH em $\text{H}_2\text{O}$
CMAP	capacidade máxima de adsorção de P (Langmuir)
CTC	capacidade de troca catiônica (propriedade do solo)
“legado de P”	estoque de P acumulado em formas pouco disponíveis
lanço	aplicação a lanço (broadcast)
linha	aplicação na linha (in-furrow)
DAI	dias após incubação (coletas 30, 90, 180, 270, 360)
<b>Ensaio, extratores e siglas normativas</b>	<b>Significado</b>
CNA	citrato neutro de amônio (ensaio de solubilidade)
AC	ácido cítrico (ensaio de solubilidade)
RTA	resina trocadora de ânions
$\text{NaHCO}_3$ 0,5 mol L <sup>-1</sup> (pH 8,5)	extrator de frações lábeis (Pi/Po)
NaOH 0,1–0,5 mol L <sup>-1</sup>	extrator de frações moderadas/não lábeis (Pi/Po)
HCl 1,0 mol L <sup>-1</sup>	extrator de Pi-Ca
$\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$	oxidação/extração de fração residual

<b>Estatística, modelagem e softwares</b>	<b>Significado</b>
ANOVA	análise de variância
LSD	<i>least significant difference</i> (diferença mínima significativa)
CV%	coeficiente de variação
PCA	<i>principal component analysis</i> (análise de componentes principais)
HCPC	<i>hierarchical clustering on principal components</i>
MEE	Modelagem de Equações Estruturais
SEM	<i>Structural Equation Modeling</i> (versão em inglês de MEE)
CFI	<i>Comparative Fit Index</i>
TLI	<i>Tucker–Lewis Index</i>
RMSEA	<i>Root Mean Square Error of Approximation</i>
SRMR	<i>Standardized Root Mean Square Residual</i>
AIC	<i>Akaike Information Criterion</i>
BIC	<i>Bayesian Information Criterion</i>
$\chi^2$	qui-quadrado (estatística de ajuste)
gl	graus de liberdade (df)
R <sup>2</sup>	coeficiente de determinação
$\beta$	coeficiente padronizado (efeito)
p	valor de significância (p-valor)
r	correlação
ML	<i>maximum likelihood</i> (estimador)
NLMINB	método de otimização (R/lavaan)
R	software R
dplyr	pacote do tidyverse para manipulação eficiente de dados
ggplot2	pacote para visualização de dados baseado na Gramática dos Gráficos
lavaan	pacote para MEE/SEM: estimação (ML), índices de ajuste (CFI, TLI, RMSEA, SRMR), efeitos ( $\beta$ ), R <sup>2</sup>
lavaanPlot	extensão do lavaan para gerar diagramas de caminho dos modelos SEM
PerformanceAnalytics	pacote para análise exploratória e métricas de desempenho/risco; útil para matrizes e gráficos de correlação.
readxl	pacote para importar planilhas Excel (.xlsx, .xls) diretamente no R
MVN	pacote para testes e diagnósticos de normalidade multivariada (Multivariate Normality)
<b>Conceitos biológicos</b>	<b>Significado</b>
DNA	ácido desoxirribonucleico
RNA	ácido ribonucleico
ATP	adenosina trifosfato
<i>B. subtilis</i> ,	<i>Bacillus subtilis</i>
<i>B. megaterium</i>	<i>Bacillus megaterium</i>

<b>Unidades e formas de expressão</b>	<b>Significado</b>
%	porcentagem
mg L <sup>-1</sup>	miligrama por litro
mg kg <sup>-1</sup>	miligrama por quilograma
mg dm <sup>-3</sup>	miligrama por decímetro cúbico (rotina de fertilidade)
mol L <sup>-1</sup>	mol por litro (molaridade)
kg ha <sup>-1</sup>	quilograma por hectare
g kg <sup>-1</sup>	grama por quilograma
cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	centimol de carga por kg (para CTC)
m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	fração volumétrica (umidade, se usada)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	pentóxido de fósforo (expressão de teor em fertilizantes)
N	nitrogênio (teor em fertilizantes)
<b>Sensores, índices e materiais biológicos</b>	<b>Significado</b>
SPAD	índice de clorofila (medidor SPAD)
Dualex <sup>®</sup>	sensor óptico não destrutivo
Chl-SPAD	clorofila total (SPAD)
ChlA-Clorofilog	clorofila a (Clorofilog)
ChlB-Clorofilog	clorofila b (Clorofilog)
Fla-Dualex	flavonoides (Dualex)
Anth-Dualex	antocianinas (Dualex)
cv. CZ48B32IPRO RR2	cultivar de soja (Creden <sup>®</sup> Basf <sup>®</sup> )
cv. NK555 VIP3	cultivar de milho (Syngenta <sup>®</sup> )

## RESUMO GERAL

LOURINI, SIMONE HEMKEMEIER. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, outubro de 2025. **Manejo de adubação fosfatada com fertilizantes de eficiência aumentada**. Orientador: Prof. DSc. Aurélio Rubio Neto. Coorientadores: Prof. DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues; Prof. DSc. Thiago de Souza Celestrino.

O fósforo (P) é vital à produtividade agrícola e à segurança alimentar. Apesar das reservas globais de rochas fosfatadas, sua distribuição concentrada exige o uso mais eficiente do nutriente e menor dependência externa. Nos solos tropicais brasileiros, a acidez e a presença de óxidos de ferro e alumínio intensificam a fixação do P e reduzem a eficiência agrônômica, sobretudo com fontes altamente solúveis. Estratégias de manejo inteligente do fósforo, guiadas pelos 4C (fonte, dose, local e momento certos), têm se destacado por integrarem eficiência, sustentabilidade e economia circular. Nessa perspectiva, aditivos orgânicos e poliméricos aplicados aos fertilizantes representam alternativas promissoras para modular a liberação do P e reduzir perdas. Com esse objetivo, foram conduzidos experimentos de incubação em casa de vegetação, modelagem de equações estruturais (MEE) e experimentos a campo com soja e milho, visando compreender a dinâmica e o aproveitamento do P em diferentes classes de solo e condições de manejo. Na incubação, utilizaram três solos contrastantes: Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf), Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) e Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe). Cada solo sob delineamento fatorial  $2 \times 3 + 1$ , com duas fontes (MAP e ST), três condições de aditivos (sem, KimcoatBioHP® e IFCoat) e um controle, com coletas de amostras de solo aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias. As frações de P foram determinadas pelo fracionamento sequencial de Hedley (1982), em que o P em solução foi extraído com cloreto de amônio (NH<sub>4</sub>Cl). Os resultados foram integrados por análises multivariadas e pela MEE, considerando as frações mensuradas como variáveis observadas associadas a

constructos latentes (Pools Orgânico, Inorgânico, Mineral, Ocluso e Disponível), permitindo identificar os principais determinantes da disponibilidade de P em cada solo. A dinâmica do P variou entre solos, fontes e aditivos. No RQo, solo arenoso e de baixa CTC, o MAP com aditivos aumentou o Pi-solução aos 30 dias, mas o P foi rapidamente convertido em Pi-NLábil e Pi-ocluso, reduzindo a persistência. A partir dos 90 dias, o ST sem aditivos manteve maior disponibilidade, indicando que, nesse solo, os aditivos não são recomendados e o manejo deve priorizar fontes de liberação lenta e aplicações parceladas. No LVAwf, rico em óxidos de Fe e Al, observou-se forte imobilização inicial, com o P ocluso atuando como reserva secundária. O MAP + IFCoat reduziu a precipitação em formas insolúveis e manteve maiores teores de Pi-solução e Pi-lábil entre 90 e 180 dias, enquanto o ST apresentou liberação mais lenta e maior retenção em Ca-fosfatos. No NVe, mais argiloso e com maior teor de matéria orgânica, a ciclagem microbiana modulou a dinâmica das frações, com aumento de Po-mic e Po-MLábil, atuando como reservatórios transitórios de P. A modelagem estrutural confirmou que diferentes pools controlaram a disponibilidade: o inorgânico no RQo, o ocluso no LVAwf e o orgânico no NVe, evidenciando que a mineralogia e a biologia do solo determinam a manutenção do P em solução. Nos experimentos de campo, avaliou-se o efeito de fontes e aditivos sobre a disponibilidade de P e o desempenho das culturas. A soja foi cultivada em delineamento inteiramente ao acaso, com MAP aplicado em linha ou a lanço, associado a seis doses do aditivo PhytohumusBio<sup>®</sup> (0–7,5 kg Mg<sup>-1</sup>). O milho foi conduzido em blocos ao acaso (2 × 4 + 1), com duas fontes (MAP e MAP + KimcoatBioHP<sup>®</sup>), quatro doses de P (70, 85, 100 e 115 % da recomendação) e um controle. Na soja, o PhytohumusBio<sup>®</sup> aumentou a produtividade de grãos (550 kg ha<sup>-1</sup>) e a eficiência agrônômica do P (73,22 kg de grãos/kg de aditivo) em relação ao MAP isolado, especialmente na aplicação em linha. No milho, o uso de MAP com KimcoatBioHP<sup>®</sup> reduziu o crescimento inicial, mas não alterou a produtividade de grãos pelo estresse climático durante o ciclo. De forma integrada, os resultados demonstram que aditivos húmicos e poliméricos associados a fertilizantes fosfatados são estratégias promissoras para otimizar o uso do P, embora a eficácia dependa da mineralogia, biologia do solo e manejo adotado. O conceito de manejo inteligente do P, mostrou-se essencial para manter o nutriente em formas lábeis, reduzir perdas e promover a sustentabilidade agrícola em ambientes tropicais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fertilizantes fosfatados; aditivos agrícolas; fracionamento de fósforo; modelagem de equações estruturais; eficiência de uso do fósforo.

## ABSTRACT

Phosphorus (P) is vital for agricultural productivity and global food security. Although global reserves of phosphate rock remain available, their geographically concentrated distribution requires more efficient nutrient use and reduced external dependence. In Brazilian tropical soils, high acidity and abundance of iron and aluminum oxides intensify P fixation and lower its agronomic efficiency, particularly when highly soluble sources are used. Smart phosphorus management strategies, guided by the 4R principles (right source, right rate, right place, and right time), have gained attention for combining efficiency, sustainability, and circular-economy approaches. In this context, organic and polymeric fertilizer additives represent promising alternatives to modulate P release and minimize losses. To evaluate these effects, greenhouse incubation experiments, structural equation modeling (SEM), and field trials with soybean and maize were carried out to assess P dynamics and utilization under contrasting soils and management conditions. Three soils were tested: Acriferric Red-Yellow Latosol (LVAwf), Typic Orthic Quartzarenic Neosol (RQo), and Typic Eutrophic Red Nitosol (NVe). Each soil followed a  $2 \times 3 + 1$  factorial design with two P sources (MAP and ST), three additive conditions (none, KimcoatBioHP<sup>®</sup>, and IFCoat), and one control, with soil samples collected at 30, 90, 180, 270, and 360 days. Phosphorus fractions were determined by the Hedley sequential fractionation method (Hedley et al., 1982), in which soluble P was extracted using ammonium chloride (NH<sub>4</sub>Cl). Results were integrated using multivariate analyses and SEM, treating measured fractions as observed variables associated with latent constructs (Organic, Inorganic, Mineral, Occluded, and Available Pools), allowing the identification of the main determinants of P availability in each soil. Phosphorus dynamics varied across soils, sources, and additives. In the RQo, a sandy soil with low cation-exchange capacity, MAP combined with additives increased soluble Pi at 30 days, but P was rapidly converted to non-labile (Pi-NL) and occluded (Pi-occ) forms, reducing its persistence. From 90 days onward, ST without additives sustained higher availability,

indicating that slow-release sources and split applications are more suitable for this soil. In the LVAwf, rich in Fe and Al oxides, strong initial immobilization occurred, with occluded P acting as a secondary reserve. MAP + IFCoat reduced precipitation into insoluble forms and maintained higher soluble and labile Pi between 90 and 180 days, while ST showed slower dissolution and greater Ca-phosphate retention. In the NVe, with higher clay and organic-matter content, microbial cycling influenced P transformation, increasing microbial (Po-mic) and moderately labile organic (Po-ML) fractions, which acted as transient reservoirs. SEM results confirmed distinct controlling pools: the inorganic pool in RQo, occluded pool in LVAwf, and organic pool in NVe, showing that soil mineralogy and biology govern P maintenance in solution. Field experiments evaluated source and additive effects on P availability and crop performance. Soybean was grown under a completely randomized design with MAP applied in rows or broadcast, combined with six PhytohumusBio<sup>®</sup> doses (0–7.5 kg Mg<sup>-1</sup>). Maize was grown in randomized blocks (2 × 4 + 1) with two sources (MAP and MAP + KimcoatBioHP<sup>®</sup>), four P rates (70, 85, 100, and 115 % of the recommendation), and a control. In soybean, PhytohumusBio<sup>®</sup> increased grain yield by 550 kg ha<sup>-1</sup> and P agronomic efficiency by 73.2 kg grain kg<sup>-1</sup> additive compared with MAP alone, especially under row application. For maize, MAP + KimcoatBioHP<sup>®</sup> reduced early growth but did not affect final yield, due to climatic stress during the season. Overall, the results demonstrate that humic and polymeric additives associated with phosphate fertilizers are promising tools to improve P use efficiency. Their effectiveness, however, depends on soil mineralogy, biological activity, and management strategy. The smart phosphorus management concept, integrating the right soil, source, and additive, proved essential to maintain P in labile forms, reduce losses, and support sustainable agriculture in tropical environments.

**KEYWORDS:** Phosphate fertilizers; agricultural additives; phosphorus fractionation; structural equation modeling; phosphorus use efficiency.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O fósforo (P) é um elemento essencial à vida e à produtividade agrícola, participando de processos bioquímicos vitais, como a fotossíntese, o metabolismo energético (ATP) e a síntese de ácidos nucleicos (DNA e RNA) (Bai *et al.*, 2020; Lehninger, 1973). Sua importância transcende a escala biológica: o P sustenta a segurança alimentar global e integra a base da geopolítica dos fertilizantes, visto que as reservas de rocha fosfática se concentram em poucos países. Segundo o U.S. Geological Survey (Jasinski, 2025), os recursos globais ultrapassam 300 bilhões de toneladas, e estudos recentes indicam que, com avanços tecnológicos e maior eficiência de uso, esses recursos podem sustentar a demanda por mais de mil anos (Scholz *et al.*, 2025). Portanto, o desafio contemporâneo não é a exaustão física, mas a gestão eficiente, justa e sustentável desse nutriente estratégico, alinhando com os princípios de economia circular e segurança alimentar.

Nos sistemas agrícolas, a baixa eficiência de uso do P é um dos principais gargalos à sustentabilidade. Apenas uma pequena fração do fertilizante aplicado é aproveitada pelas plantas, por causa da rápida imobilização por adsorção e precipitação, especialmente em solos tropicais (Guedes *et al.*, 2016; Shen *et al.*, 2011). No Brasil, mais de 80% do P utilizado é importado, e a elevada acidez e abundância de óxidos de ferro e alumínio intensificam a fixação, reduzindo a disponibilidade do nutriente (Marschner, 2012; Novais; Smyth, 1999). Diante desse cenário, estratégias de manejo inteligente do P, guiadas pelos princípios dos 4C (fonte certa, dose certa, local certo e momento certo), ganham relevância por aliam eficiência de uso, sustentabilidade e resiliência produtiva. A adoção de fontes de liberação controlada, aditivos orgânicos e poliméricos e microrganismos solubilizadores de fosfato representa um caminho promissor para reduzir perdas e ampliar o aproveitamento do “legado de P” acumulado nos solos agrícolas (Guelfi *et al.*, 2022; Pavinato *et al.*, 2020; Withers *et al.*, 2018).

Compreender a dinâmica do P em ambientes tropicais é essencial para orientar o uso racional dos fertilizantes e o desenvolvimento de tecnologias adaptadas às condições edáficas locais. Solos brasileiros, altamente intemperizados e com elevada capacidade de fixação, respondem de forma distinta às fontes e manejos de P. Nesse contexto, a combinação entre o fracionamento sequencial de Hedley *et al.* (1982) e a modelagem de equações estruturais (MEE) constitui uma abordagem inovadora para identificar os principais pools de P e compreender as interações sob fontes e aditivos. De forma complementar, experimentos conduzidos em condições de campo ressaltam a importância de avaliar o desempenho de tecnologias em contextos produtivos reais, ampliando o entendimento sobre a eficiência agrônômica dos fertilizantes. Essa integração metodológica contribui para o avanço de um manejo mais inteligente e sustentável do P na agricultura.

Parte-se da hipótese de que a eficiência do uso do P nos solos pode ser ampliada por meio do manejo inteligente das fontes e da aplicação de aditivos orgânicos e poliméricos, capazes de modular a dinâmica entre as frações inorgânicas e orgânicas e reduzir as perdas por fixação e precipitação. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a dinâmica do fósforo em diferentes classes de solos tropicais e subtropicais sob aplicação de fontes fosfatadas e aditivos de revestimento, utilizando o fracionamento químico e a modelagem de equações estruturais (MEE) para identificar os principais pools responsáveis pela manutenção do P em solução, além de verificar, em condições de campo, os efeitos dessas tecnologias sobre a disponibilidade do nutriente e a eficiência agrônômica dos fertilizantes.

### 1.1 Dinâmica do P no solo e fatores que influenciam a disponibilidade

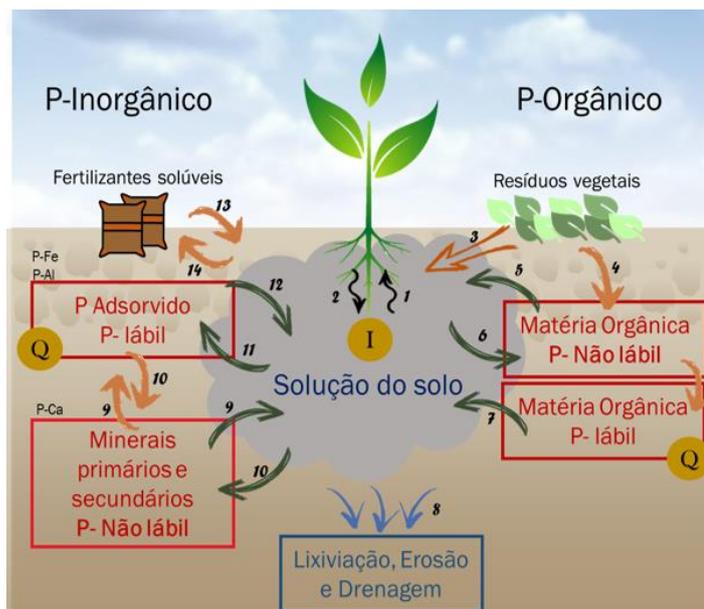
O fósforo pode ser encontrado nos solos em duas formas principais, dependendo da natureza do composto que possui ligação, sendo o P orgânico (Po) e o P inorgânico (Pi) (Leite *et al.*, 2016; Ikhajiagbe *et al.*, 2020; Kour *et al.*, 2021). As frações orgânicas de P são compostas principalmente por ésteres associados a matéria orgânica, biomassa microbiana e substâncias húmicas, sendo que essa forma (Po) necessita ser mineralizada para se tornar disponível às plantas (Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000; Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008; Souza Júnior *et al.*, 2012). No entanto, o P inorgânico pode ser encontrado em diversos compartimentos do solo, incluindo minerais primários como a apatita, ou ainda estar presente na solução do solo, pode estar adsorvido aos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio da fração argila, precipitado com alumínio, ferro (em solos

ácidos) ou cálcio (em solo alcalinos) e também uma parte do P pode estar associada a compostos de baixa solubilidade, ou seja na fração oclusa, aprisionado na estrutura cristalina de óxidos de Fe e Al, como aluminofosfatos ( $\text{AlPO}_4$ ) e silicofosfatos (Novais; Smyth, 1999; Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008; Souza Júnior *et al.*, 2012; Weil; Brady, 2017).

O fósforo é comumente encontrado nos solos na forma de fosfatos inorgânicos, incluindo ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), dihidrogenofosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), hidrogenofosfato ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) e fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), variando de acordo com o pH do solo (Novais; Kamprath, 1979; Weil; Brady, 2017). No entanto, o P é mais encontrado na forma oxidada como  $\text{PO}_4^-$ , tanto na forma inorgânica, orgânica, dissolvida ou particulada (Weil; Brady, 2017).

Nos solos o Po pode representar de 15 a 80% do P total variando de acordo com os processos de mineralização e imobilização (Condron; Tiessen, 2005; Gatiboni; Kaminski; Santos, 2005; Weil; Brady, 2017), no entanto o Pi é a forma utilizada pelas plantas (Marschner, 2012; Novais; Smyth, 1999). Geralmente, o teor total de P no solo varia entre 200 a 3000  $\text{mg kg}^{-1}$ , porém, o P em solução do solo representa concentrações muito baixas, variando de 0,002  $\text{mg/L}$  a cerca de 2  $\text{mg/L}$ , neste último caso para solos férteis ou fertilizados (Novais; Smyth, 1999; Novais; Smyth; Nunes, 2007). Entretanto, para a maioria dos solos tropicais, a concentração é menor que 0,2  $\text{mg L}^{-1}$ , decorrente dos baixos teores naturais, baixa solubilidade dos compostos fosfatados e da imobilização de P, devido às fortes interações que ocorrem com os constituintes destes solos (Rolim Neto *et al.*, 2004). Dessa forma, é imprescindível compreender as relações e interações das formas de fósforo no solo e dos fatores que influenciam a disponibilidade para aplicação de manejos eficientes.

Além de estar dividido entre duas formas principais (Po e Pi), nesses dois grupos o fósforo também pode ser fracionado de acordo com a relação solo-planta e o grau de labilidade no solo (Figura 01) (NOVAIS *et al.*, 2007).



**Figura 1.** Formas de fósforo no sistema solo-planta: 1. Absorção ou influxo; 2. Efluxo ou extrusão; 3. Deposição de fosfatos de baixo peso molecular; 4. Deposição de matéria orgânica; 5. Mineralização lenta por microrganismos heterotróficos; 6. Imobilização na biomassa microbiana; 7. Mineralização rápida por microrganismos heterotróficos; 8. Perdas; 9. Intemperismo (lento); 10. Precipitação ou fixação; 11. Adsorção; 12. Dessorção; 13. Solubilização de fertilizantes minerais; 14. Retrogradação. Adaptado de Havlin, (2017) e Novais; Smyth; Nunes, (2007).

O Po do solo tem origem nos resíduos vegetais, microbianos e nos produtos de sua decomposição (Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000; Conte; Anghinoni; Rheinheimer, 2002, 2003; Martinazzo *et al.*, 2007). Enquanto, o Pi do solo provém principalmente do intemperismo de seu material de origem, principalmente rochas fosfáticas fosforitas e apatitas, componente principal na fabricação de vários fertilizantes fosfatados (Tiessen, 2005; Alcarde, 2007; Bazani, 2014). Entretanto esse processo, assim como a mineralização de compostos orgânicos, é insuficiente para atender a demanda das plantas cultivadas, necessitando da adição de fertilizantes fosfatados (Tiessen, 2005; Alcarde, 2007; Stauffer E *et al.*, 2019; Barbosa, 2020). Após a liberação do P na solução, este pode ser absorvido pelas plantas, imobilizado por microrganismos, adsorvido a superfície de argilas e outros minerais, ou ainda formar minerais secundários, quando precipitado com Ca, Fe ou Al (Novais; Smyth; Nunes, 2007; Pavinato, 2007). Podendo também retornar à solução por meio de processos conhecidos como mineralização, dessorção e dissolução (Havlin, 2017).

A solução do solo é a fração em que se encontra o P disponível para as plantas. Portanto, a disponibilização do P depende da interação dos dois compartimentos: solução do solo, que constitui o fator intensidade (I) e fase sólida, denominada fator quantidade (Q), que armazena os fosfatos que abastecem a solução, dos quais podem ser lábeis, não

lábeis, ou moderadamente lábeis. A dinâmica de comportamento que explica como o primeiro compartimento é abastecido pelo segundo é chamado fator capacidade (C), e representa o poder tampão ou a taxa de recomposição, controlada pela energia de ligação do nutriente ou pelo grau de labilidade (Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008).

O fator capacidade de fósforo (C ou FCP) pode ser entendido como a resistência do solo as mudanças no fator I quando se põe ou se retira P do solo (Q) (Novais; Smyth, 1999). A relação Q/I, medida do FCP ou Poder Tampão de P do solo, é maior em solos com maior adsorção de P, como os mais argilosos e mais intemperizados e menor em solos com menor adsorção, como os arenosos e, se argilosos, menos intemperizados (Novais; Smyth; Nunes, 2007). Os métodos de avaliação da fertilidade do solo procuram estimar a porção de Q passível de repor I para predizer a necessidade de suplementação do nutriente (Santos *et al.*, 2008).

O fósforo em solução pode aumentar com a mineralização da matéria orgânica. No entanto, nesse processo, o fósforo presente na solução do solo pode ser temporariamente imobilizado pela microbiota (Novais; Smyth; Nunes, 2007; Pavinato, 2007). A dinâmica do fósforo orgânico é regulada, principalmente, pela relação C/P, por meio dos processos antagônicos de mineralização e imobilização. Esses processos são influenciados pela quantidade de fósforo presente na matéria orgânica, sendo que o ponto de equilíbrio ocorre quando os resíduos vegetais contêm 0,2% de P. Acima desse valor, ocorre a mineralização com liberação de P em solução, enquanto abaixo, prevalece a imobilização na biomassa microbiana, até que a relação C/P seja reduzida pela decomposição (Novais; Smyth, 1999).

A aplicação de P via fontes externas, seja mineral ou orgânica, pode causar desequilíbrio da fração lábil. Pois alto teor de P em solução favorece o aumento da adsorção e difusão de P, passando para as raízes das plantas, induzidas pelo gradiente de concentração formado pela absorção de P-solução. Assim, o P-lábil atua como agente tamponante, adsorvendo o excesso de P em solução e liberando P, conforme a absorção ocorre, de acordo com cada solo (Novais; Smyth, 1999).

A complexa dinâmica do fósforo interfere na proporção que este elemento é encontrado na solução ou nas fases sólidas do solo, interferindo na assimilação microbiana de P, dissolução, transporte e disponibilidade desse nutriente para as plantas (Bennett; Schipanski, 2013). Além disso, as baixas concentrações de P em solução do solo, limita o movimento via fluxo de massa, predominando por meio de difusão, que

possibilita a captação de fósforo pelas raízes das plantas, porém este processo ocorre a taxa muito lenta para suprir as necessidades das culturas (Lima, 2020).

Dentre as reações do P no solo, destacam-se as de sorção, dessorção, solubilização e complexação (adsorção e precipitação) e dentre os atributos do solo que interferem nestas reações, tem-se o físico-químico e propriedades mineralógicas do solo, como pH, grau de intemperismo, quantidade e qualidade de argila, além de fatores ambientais, como umidade e temperatura (Sparks, 2003; Pierzynski; McDowell; Thomas Sims, 2005; Santos et al., 2008) presença e composição da matéria orgânica (Novais; Smyth; Nunes, 2007), e interações entre elementos como o silício (Carvalho *et al.*, 2001; Tokura *et al.*, 2007, 2011), flúor (Parfitt, 1978; Novais; Smyth; Nunes, 2007), ferro, alumínio, manganês e cálcio (Brady; Weil, 2013). Ademais, a solubilização dos compostos e fertilizantes fosfatados adicionados ao solo influenciam na dinâmica e disponibilidade (Barrow, 1983; Raij, 2004).

Deve-se considerar ainda o grau de labilidade da fração é dependente do grau de intemperismo do solo, das características físico-químicas, da mineralogia, da textura, do teor de matéria orgânica, da atividade biológica e da vegetação predominante (Walker; Syers, 1976; Cross; Schlesinger, 1995).

Solos que sofreram grande intemperismo, são ricos em oxihidróxidos de Fe na fração argila, possuindo elevada capacidade de adsorção de P, principalmente, aqueles com baixo teor de matéria orgânica, em que o ponto de carga zero está entre 9 a 10, levando a predominância de cargas positivas variáveis, podendo formar ligações fortes com o ânion fosfato, envolvendo compartilhamento de oxigênio (Parfitt, 1978; Barrow, 1986; Costa; Bigham, 2009). Com a intensificação do intemperismo, há redução do fornecimento de P, de modo que há também o aumento dos sítios de adsorção, levando a formação de complexos de alta especificidade e energia de ligação, reduzindo a disponibilidade de P em solução, portanto, transformando o solo fonte em dreno de fósforo (Novais; Smyth; Nunes, 2007). Caso típico das regiões tropicais, como solos do Cerrado brasileiro, que apresentam solos altamente intemperizados, propensos a eletropositividade e menor densidade de carga negativa (CTC), aumentando a adsorção de P na forma de ânions, reduzindo a quantidade na solução do solo e disponibilidade para as plantas, ou seja, o solo passa a ser dreno de P (Novais; Smyth, 1999; Novais; Smyth; Nunes, 2007; Baldotto; Velloso, 2014).

O P aplicado via fertilizantes fosfatados pode reagir com os sítios de ligação no solo, e essa reação é denominada como I-adsorção específica, ocorrendo devido à ligação

entre o P e os minerais argilosos (Tiecher *et al.*, 2012), ou II-precipitação, por meio de ligação com óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) ou com o cálcio (Ca), este último ocorrendo principalmente em solos alcalinos (Sample; Soper; Racz, 1980; Novais; Smyth; Nunes, 2007). Assim, após a solubilização dos fertilizantes, a reação do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  com outros íons, dependerá da concentração e atividade destes, assim como do pH, levando a precipitação do P com Fe e Al em pH ácido e precipitação com Ca em pH alcalino, ou pode transformar em Pi-Lábil em dias ou em poucas horas (Novais; Smyth, 1999; Penn; Camberato, 2019).

De forma generalizada, quanto mais argiloso o solo, maior a quantidade de P a ser aplicada para atender a demanda da planta, em função dos solos tropicais serem muito intemperizados tornam-se alto dreno de P, por causa da adsorção do P na superfície dos colóides e, ou, mesmo pela precipitação do P na solução do solo quando em contato com o Fe e Al esses elementos presentes (em solos ácidos) e devido à precipitação do P quando combinado com o Ca (em solos corrigidos) (Novais; Smyth, 1999; Falcão; Silva, 2004; Guedes *et al.*, 2016).

O fósforo em solução, principalmente em solos tropicais, comuns no Brasil, pode ser absorvido pelas raízes das plantas ou imobilizado pelos microrganismos, e quando em excesso ou rapidamente liberado na forma P-solução, pode ser precipitado com Fe, Al e Ca ou adsorvido nas superfícies de óxidos e oxihidróxidos de Fe e Al, principalmente àqueles mal cristalizados e com alto desbalanço de cargas, e de outros minerais de argilas (Novais; Smyth; Nunes, 2007).

A incorporação do P às formas orgânicas do solo ocorre, principalmente pela ação da microbiota, que realiza processos de mineralização e imobilização regulados pela relação C/P (Novais; Smyth, 1999; Novais; Smyth; Nunes, 2007; Pavinato, 2007). Frações orgânicas lábeis e moderadamente lábeis constituem substratos para microrganismos e podem retornar gradualmente à solução do solo, formando um legado de fósforo com potencial de uso futuro (Brookes; Powlson; Jenkinson, 1982; He *et al.*, 2023). A fração Po-Nlábil, apesar de mais resistente à mineralização, também pode se transformar sob condições específicas, contribuindo para o estoque de longo prazo de fósforo no solo.

A precipitação do P com o Al, Fe e Ca, leva a formação de variscita, strengnita e hidroxiapatita, respectivamente, com variação da solubilidade dependente do pH (Do Nascimento *et al.*, 2018; Raij, 1991). Em meios alcalinos, os fosfatos Fe-P e Al-P apresentam menor estabilidade, ou seja, são mais solúveis. Já os fosfatos de Ca têm a

solubilidade aumentada em meio ácido (Novais; Smyth; Nunes, 2007). Dessa forma, pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub> entre 5,5 e 6,8 levam a menor formação de precipitados (Sample; Soper; Racz, 1980).

Em solos agricultáveis com altos teores de matéria orgânica, como os de várzea, a maior parte do P tende a precipitar com Ca (Arenberg; Liang; Arai, 2020). Nesses ambientes, o H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> em solução pode formar complexos ternários monodentados com Ca<sup>2+</sup> e ácidos húmicos da matéria orgânica (Audette *et al.*, 2020), reduzindo a mobilidade e a disponibilidade do P lábil. Além disso, a acidificação do solo causada pela adição de N pode favorecer a formação de frações de P ligadas a compostos orgânicos, alterando a a dinâmica no solo (Zhang; Shi; Fu, 2020).

O processo de adsorção do P no solo ocorre, inicialmente de forma rápida, pela atração eletrostática dos grupamentos OH<sup>-</sup> e OH<sup>2+</sup> presentes na superfície dos coloides, formando complexos de esfera externa reversíveis, disponíveis para absorção vegetal (Hingston; Posner; Quirk, 1972; Parfitt, 1978; Barrow, 1983; Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008).. E, com o passar do tempo, os íons fosfatos em solução deslocam esses grupamentos, formando uma ligação predominantemente covalente, de alta energia, entre o fosfato e os coloides, denominado complexo de esfera interna (Hingston; Posner; Quirk, 1972), inicialmente mononucleados e, posteriormente, para formas binucleadas ou oclusas, aprisionadas nos óxidos de Fe e Al, como aluminofosfatos e silicofosfatos (Novais; Smyth, 1999; Souza Júnior *et al.*, 2012; Weil; Brady, 2017). Esse fenômeno também é conhecido como quimiossorção ou adsorção específica do fosfato, e pode levar anos para atingir o equilíbrio (Barrow, 1986), porém são de difícil reversão.

Manejes específicos podem ser empregados para reduzir as perdas de P por adsorção e precipitação com Fe livre em solução. A adoção de sistemas de cultivo que aumenta os teores de matéria orgânica no solo, podem impedir o contato direto do H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> com a superfície dos oxihidróxidos de Fe (Do Nascimento *et al.*, 2018).

De forma geral, muitos fatores interferem na dinâmica do P nos solos, tanto biológicos como químicos (Pavinato, 2007; Withers *et al.*, 2018). Essa dinâmica complexa pode ser melhor analisada por meio do fracionamento químico de fósforo, incluindo variações decorrentes da ação antrópica (Conte; Anghinoni; Rheinheimer, 2002, 2003).

## 1.2 Fertilizantes fosfatados e tecnologias de eficiência aumentada

O fósforo, apesar de ser um elemento fundamental para a vida, é encontrado em quantidades limitadas e raramente está em altas concentrações (Weil; Brady, 2017). A escassez e essencialidade tornam-no fator limitante para a manutenção dos ecossistemas, inclusive dos sistemas agrícolas (Elser; Bennett, 2011; Carrington, 2019; Bai *et al.*, 2020). Portanto, a utilização de fertilizantes fosfatados é necessária.

Visando elevar o fósforo na solução do solo, a adubação fosfatada é realizada, principalmente em solos que apresentam baixa disponibilidade desse nutriente. Assim, o uso de fertilizantes minerais tem crescido no mundo, sendo introduzido a partir da Revolução Verde no final do século XX e continua em expansão no século XXI (Shreve; Brink, 1997; Hansel, 2013). Inicialmente, a rocha fosfática, vista como uma fonte barata e abundante de fósforo, passou a ser amplamente utilizada no lugar de fontes orgânicas (Shreve; Brink, 1997; Vogel *et al.*, 2020).

Os fertilizantes fosfatados minerais são provenientes de depósitos de rochas ígneas (15%) e de rochas sedimentares (85%), além de biogenéticas (Souza; Fonseca, 2017), recursos naturais não renováveis e as reservas estão em declínio, fazendo com que a busca por tecnologias e alternativas para aumentar a eficiência na utilização destes recursos seja incessante (Zapata; Roy, 2004; Achary *et al.*, 2017). E entre as fontes de P tem-se: (i) fosfatos naturais (rocha fosfática apatita moída); (ii) termofosfatos (obtida por meio de processo térmico); (iii) fosfatos totalmente acidulados (acidulação total); (iv) fosfatos alternativos (parcialmente acidulados) (Prochnow; Alcarde; Chien, 2004).

As reservas de rochas fosfatadas brasileiras, são na maioria de origem ígnea e representam a cerca de 2% das reservas mundiais (Jasinski, 2025), porém possuem baixo teor de P. Dessa forma, após serem lavradas, britadas e homogeneizadas necessitam passar por um processo de beneficiamento, para que haja a concentração dos minerais fosfatados e, só então, são encaminhadas ao processamento químico para se tornarem fertilizantes solúveis e, na maioria dos casos, o produto obtido, após esses processos, apresenta entre 36 e 38% de  $P_2O_5$  (Cekinski, 1990). Os processos industriais após coleta e moagem, visam quebrar a estrutura apatítica estável em que o P está estruturado, convertendo-o em formas mais solúveis em água ou na solução do solo, podendo ser usado como fertilizante (Van Kauwenbergh, 2010).

Para a fabricação de fosfatos solúveis há grande utilização de ácido sulfúrico, importado em grande escala pelo Brasil (MME, 2009). O ácido sulfúrico reage com o concentrado de rocha fosfática por via úmida, transformando o fosfato tricálcico contido

nas rochas em forma mais solúvel (monocálcico) ou em ácido fosfórico (Lopes; Guilherme; Cunha, 2010). De acordo com a quantidade de ácido sulfúrico utilizada, haverá reações de acidulação parcial, para a produção de superfosfato simples e do fosfato parcialmente acidulado, ou completa, para o processo de fabricação do ácido fosfórico que será usado para a produção do superfosfato triplo, fosfato de monoamônio e fosfato diamônio (Lopes; Guilherme; Cunha, 2010). Os fertilizantes fosfatados são divididos em três grupos, solúveis, pouco solúveis e insolúveis, e dentre esses, os mais utilizados na agricultura são os solúveis em água (90%) (Moreira *et al.*, 1997).

A fonte monoamônio fosfato (MAP) é obtida por meio da reação do ácido fosfórico com amônia, apresentando altas concentrações de nitrogênio (N), entre 10 a 12%, e concentração entre 48 a 60% de pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ) (Malavolta *et al.*, 1981; Borges *et al.*, 2023). Portanto, após aplicado ao solo torna-se rapidamente disponível para as plantas nas formas iônicas  $NH_4^+$  e  $H_2PO_4^-$  (Reetz Jr, 2016).

O superfosfato triplo (ST) é produzido por meio da reação do ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) com rocha fosfática enriquecida (concentrado fosfatado), possuindo entre 7 a 12% de cálcio (Ca), contendo 41% de  $P_2O_5$  e a principal forma de fósforo (P) é o fosfato monocálcico (Malavolta *et al.*, 1981; Rajj *et al.*, 1996; Silva *et al.*, 2005).

Os fertilizantes fosfatados podem ser classificados quanto às solubilidades em água, citratoneutro de amônio (CNA) e ácido cítrico (AC), analisados conforme a legislação brasileira (Sousa; Lobato, 2004). O MAP ( $NH_4H_2PO_4$ ) e o ST ( $Ca(H_2PO_4)_2$ ) são considerados fertilizantes de alta qualidade, pois são sais de fosfato solúveis em água, rapidamente dissolvidos na solução do solo e prontamente disponibilizam P para absorção pelas plantas. No entanto, são menos eficazes em fornecer o nutriente P em momentos críticos do desenvolvimento das plantas cultivadas (Bolan; White; Hedley, 1990; Fageria, 2009; Chien *et al.*, 2011), principalmente por causa dos processos de fixação.

A aplicação de fertilizantes fosfatados inicia processos imediatos de dissolução e liberação de ânions fosfato ( $PO_4^{3-}$ ) na solução do solo (Novais; Smyth, 1999; Novais; Smyth; Nunes, 2007), cuja intensidade e velocidade dependem da fonte utilizada. O monoamônio fosfato (MAP) apresenta dissolução completa, liberando simultaneamente fosfato e amônio ( $NH_4^+$ ), enquanto o superfosfato triplo (ST) apresenta dissolução parcial, liberando fosfato e formando fosfato monocálcico ( $Ca(H_2PO_4)_2$ ) que pode reagir com o cálcio presente no solo, formando o fosfato bicálcico ( $CaHPO_4$ ), portanto menos solúvel em água (Lindsay; Lehr; Stephenson, 1959; Lindsay; Stephenson, 1959; Lindsay, 1979; Malavolta *et al.*, 1981; Reetz Jr, 2016).

Assim, o P em solução pode ser absorvidos pelas plantas ou microrganismos, além de poder ser liberado para o meio ambiente, no entanto, geralmente ocorrem reações de fixação de P pelos constituintes do solo (Aziz *et al.*, 2014; Rafique *et al.*, 2020). As reações que ocorrem entre o fósforo e os sítios de ligação no solo, levam à formação de compostos estáveis de baixa solubilidade e redução da disponibilidade de P (Nunes; Santos; Guelfi, 2022).

Dessa forma, a desaceleração da dissolução dos grânulos de fertilizante por revestimento com material adequado (sintético ou natural) pode resultar em disponibilidade aumentada e contínua de P (Ali; Al-Juthery, 2017; Ashraf *et al.*, 2019). Pesquisas científicas têm demonstrado o potencial de fertilizantes revestidos por polímeros como estratégia para melhorar a eficiência da fertilização com P (Pauly; Malhi; Nyborg, 2002; Chagas *et al.*, 2015; Teixeira *et al.*, 2016; Da Cruz *et al.*, 2017).

A aplicação de MAP associado a ácidos orgânicos, por exemplo, pode aumentar os teores de P lábil nas proximidades dos grânulos do fertilizante, em relação à aplicação isolada dessa fonte (Do Nascimento *et al.*, 2018). Esse efeito foi atribuído à redução da precipitação do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , uma vez que o Fe foi quelatizado pelos ácidos orgânicos – fenômeno igualmente verificado em solos ricos em Ca.

Fertilizantes fosfatados com inibidores de fixação, fertilizantes quimicamente modificados e de liberação controlada, sinérgicos, blends e fertilizantes multifuncionais são opções a serem consideradas para melhorar a eficiência da fertilização fosfatada na agricultura em amplo contexto de estratégias para esse mesmo propósito (Guelfi *et al.*, 2022).

### 1.3 Fracionamento químico do P nos solos

O fósforo no solo é encontrado em duas formas principais, fósforo inorgânico (Pi) e fósforo orgânico (Po) (Leite *et al.*, 2016) e a dinâmica pode ser influenciada por fatores biológicos e químicos (Pavinato, 2007; Mignacca, 2016; Withers *et al.*, 2018). Além disso, muitos fatores afetam a disponibilidade de P para as plantas, como uso e manejo do solo, exportação de P na colheita, reposição de P exportado, capacidade das plantas em utilizar as formas menos lábeis de P (Takahashi; Anwar, 2007; Tiecher *et al.*, 2012). Portanto, conhecer a proporção de P nas diferentes frações contribui para o entendimento das transformações do fosfato nos solos, otimizando o manejo adequado de fertilizantes fosfatados (Wang *et al.*, 2023). Para tanto, o fracionamento contribui como ferramenta

fundamental na análise da dinâmica do P nos solos (Conte; Anghinoni; Rheinheimer, 2003; Viana, 2016).

As metodologias propostas para o fracionamento do fósforo implicam em extrações sequenciais de uma amostra de solo, por meio reagentes e soluções extratoras com seletividade das formas de fósforo, baseada na natureza e força das interações entre o fósforo e as fases (Po e Pi), e dos microrganismos (Condrón; Newman, 2011; Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013).

Inicialmente, em 1957, Chang e Jackson, apresentaram uma metodologia que permitia a estimativa das formas de P no solo por meio da utilização de diferentes extratores para extrair as diferentes formas de P, permitindo identificar a proporção de fosfatos de alumínio (extrator:  $\text{NH}_4\text{Cl}+\text{NH}_4\text{F}$ ), fosfatos de ferro (extrator:  $\text{NaOH}$ ), fosfatos de cálcio (extrator:  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) e fosfatos oclusos (extrator:  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7+\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ), entretanto, a metodologia não permitia a identificação das formas de Po e nem a separação das formas de Pi quanto a labilidade das formas extraídas (Chang; Jackson, 1957; Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013).

Apesar das limitações, o método proposto por Chang e Jackson (1957) ainda é utilizado nos dias atuais, inclusive no Brasil. No entanto, outras novas metodologias ganham cada vez mais espaço, como a proposta por Hedley e colaboradores em 1982 e suas respectivas modificações (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982; Souza Filho, 2014).

As principais modificações introduzidas ao método proposto por Hedley (1982) envolveram a inclusão ou substituição de soluções extratoras (Condrón; Goh; Newman, 1985; Condrón; Goh, 1989; Chen *et al.*, 2000; Tiessen; Moir, 2007). A utilização dessa metodologia apresenta como vantagem central a capacidade de discriminar as formas inorgânicas e orgânicas de fósforo presentes no solo, fornecendo, além disso, informações relevantes sobre a disponibilidade do nutriente em diferentes horizontes temporais, tanto no curto quanto no longo prazo (Zamuner; Picone; Echeverria, 2008).

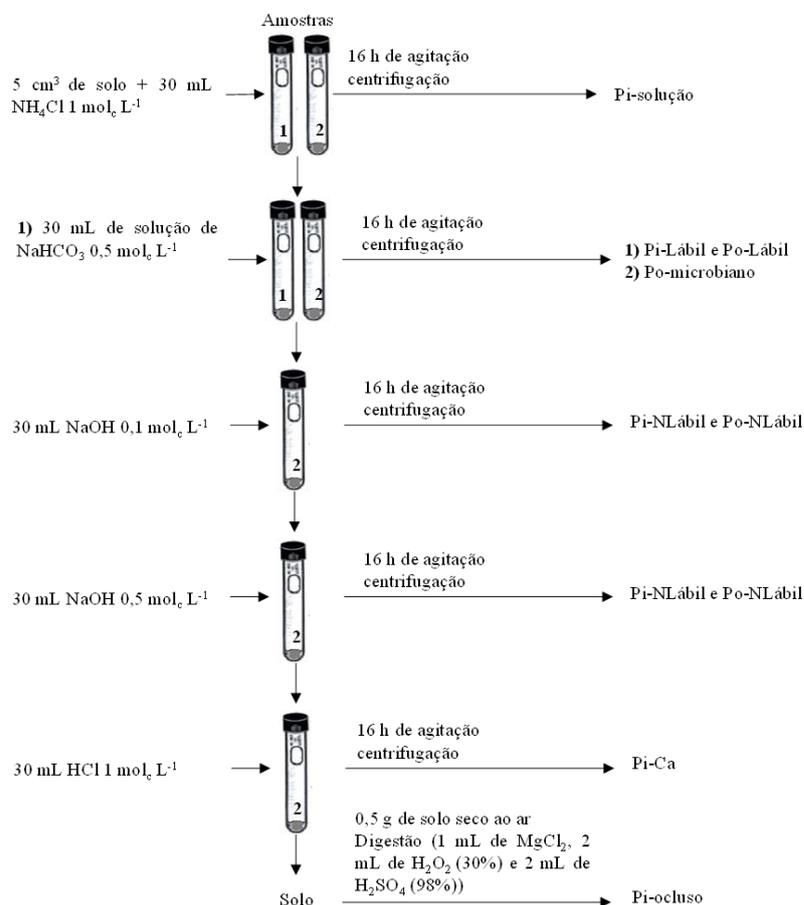
O método proposto por Hedley *et al.* (1982) (Figura 2) realiza extrações sequenciais por meio da adição de extratores da menor para a maior força de extração, para determinação das formas lábeis, pouco lábeis e não lábeis de fósforo presentes na amostra de solo (Mignacca, 2016). De forma resumida uma amostra de solo (0,5 g) é submetida aos extratores em ordem sequencial, resina trocadora de ânions (RTA) para extração de fósforo inorgânico disponível (Pi-RTA), bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  pH 8,5) para extração de fósforo inorgânico e orgânico na forma lábil (Pi-Lábil e Po-Lábil), hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$ ), para extração de fósforo inorgânico

ligado à óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Pi-Fe+Al), ligado às argilas silicatadas com energia de ligação intermediária, além da extração de fósforo orgânico ligado aos ácidos húmicos, portanto, moderadamente lábil (Po-MLábil), hidróxido de sódio aliado à ultrassonificação ( $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ) extrai as formas química e fisicamente protegidas nas superfícies internas dos microagregados, ácido clorídrico ( $\text{HCl } 1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ), para extração de fósforo inorgânico de baixa labilidade e forte adsorção presente dos fosfatos de cálcio (Pi-Ca), além da utilização ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) e peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) na extração do fósforo residual do solo (Pi + Po) considerado não lábil, portanto ocluso (P-occluso) (Viana *et al.*, 2016). Além disso, pode ser incluído o hidróxido de sódio ( $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ), para extração fósforo inorgânico e orgânico nas formas mais recalitrantes no solo e não lábeis (Pi-NLábil e Po-NLábil). As leituras dos extratos podem ser realizadas por meio de espectrofotômetro de absorção, seguindo a metodologia de Murphy e Riley (Murphy; Riley, 1962).

As formas de P no solo podem ser classificadas em frações lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis, de acordo com a capacidade de repor o P na solução do solo e, conseqüentemente, de suprir a demanda das plantas (Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008; Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013). As frações extraídas por resina trocadora de ânions (RTA) e por bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ) apresentam forte correlação com a absorção de P pelas plantas, atuando como repositores imediatos de P na solução do solo (Gatiboni *et al.*, 2007), sendo que o Pi extraído com  $\text{NaHCO}_3$  é sempre considerado lábil para as plantas. As formas moderadamente lábeis, inorgânicas (Pi) e orgânicas (Po), extraídas com  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ , são mais comuns em solos pouco intemperizados, enquanto em solos altamente intemperizados predominam as formas inorgânicas dessa classe (Guo; Yost, 1998). Já o P residual, pouco disponível, é raramente acessado em solos muito intemperizados.

A adubação fosfatada é fator determinante na dinâmica do fósforo no solo, influenciando tanto as formas orgânicas (Po) quanto as inorgânicas (Pi). Em estudo conduzido por (Carneiro *et al.*, 2011), verificou-se que a aplicação de fósforo aumentou os teores de ambas as frações, sendo as formas inorgânicas predominantes em solos cultivados com feijão e braquiária, enquanto as formas orgânicas foram mais expressivas em áreas sem cultivo submetidas à adubação fosfatada. Resultados semelhantes foram reportados por (Oliveira *et al.*, 2021), ao constatarem que, em Latossolos Vermelhos Distróficos (LVd), há tendência de acúmulo de fósforo em formas não lábeis, mesmo quando utilizados fertilizantes solúveis, especialmente em solos de baixa fertilidade. Esse

comportamento está de acordo com a literatura clássica sobre a dinâmica do fósforo em solos altamente intemperizados, nos quais a maior parte do nutriente tende a concentrar-se em frações não lábeis, com baixa disponibilidade imediata para as plantas (Novais; Smyth, 1999).



**Figura 2.** Esquema do fracionamento do fósforo no solo de acordo com o método (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982) com modificações e correlação das frações com as formas do fósforo no solo (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013). Fonte: Adaptado de (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013).

O comportamento do fósforo no solo depende do uso de fertilizantes, corretivos e dos manejos aplicados, podendo ser descrito pelas frações em que se encontra, enquanto o grau de labilidade demonstra a capacidade de suprir P na solução do solo (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013; Santos *et al.*, 2008). Sendo assim, o conhecimento das formas de P nos solos por meio do fracionamento, mostra o comportamento desse nutriente, podendo auxiliar na compreensão da dinâmica do P após a aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados e na funcionalidade ou não da aplicação de aditivos.

#### 1.4 Modelagem de equações estruturais na dinâmica do P nos solos

A Modelagem de Equações Estruturais (MEE), do inglês *Structural Equation Modeling* (SEM), surgiu há quase 80 anos a partir dos trabalhos de Wright (1934), que desenvolveu uma metodologia para decompor correlações em equações matemáticas representando hipóteses causais. Essas hipóteses eram visualizadas em “diagramas de caminho”, representações gráficas que descrevem, por meio de setas e caixas (retângulos ou quadrados), as relações presumidas entre variáveis, facilitando a interpretação da estrutura causal subjacente. Posteriormente, pesquisadores como Jöreskog e Sörbom expandiram esse conceito, incorporando a análise fatorial e permitindo não apenas descrever, mas também testar hipóteses causais em modelos estatísticos (Wright, 1934; Jöreskog; Sörbom, 1982; Iriondo; Albert; Escudero, 2003).

A MEE é empregada para investigar relações causais em dados observacionais, geralmente assumindo interações lineares, mas também permitindo modelagens não lineares. Embora não prove causalidade de forma definitiva, auxilia na seleção e exclusão de hipóteses com base em evidências empíricas, fundamentando-se no princípio de que uma relação causal implica correlação entre variáveis. A MEE consiste na aplicação de duas ou mais equações estruturais de causa e efeito para modelar relações multivariadas (Hoyle; Smith, 1994; Grace, 2006). Uma das principais vantagens é a possibilidade de representar conceitos teóricos por meio de variáveis latentes, estabelecendo interconexões simultâneas entre as relações que regem sistemas complexos, como os ecológicos (Grace, 2006; Eisenhauer *et al.*, 2015). O método tem ganhado espaço nas ciências naturais (Tian *et al.*, 2023) e, com base em equações estruturais lineares ou transformadas, permite descrever a conexão entre variáveis observáveis (mensuráveis) e não observáveis (latentes) (Boomsma, 2003; Grace; Bollen, 2008). Além disso, possibilita comparar o poder descritivo de diferentes modelos, auxiliando na escolha daquele que melhor representa as relações estudadas (Mitchell, 1992).

Normalmente, a aplicação da MEE parte de um conhecimento prévio sobre o sistema a ser estudado, o que a torna predominantemente confirmatória, embora também possa ser exploratória em determinadas abordagens (Da Silva *et al.*, 2022). Essa técnica é útil para representar e avaliar mediações, bem como para testar relações diretas e indiretas entre variáveis (Eisenhauer *et al.*, 2015). A estruturação do modelo é baseada em equações de regressão linear organizadas de acordo com relações causais hipotetizadas (Kaplan, 2000; Boomsma, 2003; Pilati; Laros, 2007).

Apesar de ainda pouco utilizada nas ciências naturais, a MEE vem apresentando aumento significativo de uso nos últimos anos, especialmente em áreas como a ecologia e a fertilidade do solo, permitindo uma compreensão mais integrada das interações entre fatores ambientais, biológicos e químicos (Zhao *et al.*, 2023).

Diversos pesquisadores têm empregado a Modelagem de Equações Estruturais (MEE) como ferramenta fundamental para compreender os complexos processos que regem o comportamento do fósforo (P) no solo. Entre os trabalhos pioneiros que estabeleceram as bases para essa abordagem, destacam-se as contribuições de Gama-Rodrigues e colaboradores (Gama-Rodrigues *et al.*, 2014), cujas investigações sobre as transformações biogeoquímicas do P em solos tropicais tornaram-se referência na área. O avanço metodológico subsequente foi significativamente impulsionado por Sales e colaboradores (Sales *et al.*, 2015), que aprimoraram modelos iniciais por meio de reespecificações nos diagramas de caminho, ampliando a capacidade de interpretação dos resultados.

A aplicação da MEE manteve-se em expansão com estudos como o de Hou e colaboradores (Hou *et al.*, 2016), que investigaram a dinâmica do P em solos não fertilizados, e o de Sales e colaboradores (Sales *et al.*, 2017), que exploraram as inter-relações entre o ciclo do P e as propriedades edáficas. Tais avanços possibilitaram abordagens mais específicas, como as desenvolvidas por Tian e colaboradores (Tian *et al.*, 2023) em ecossistemas florestais e por Da Silva e colaboradores (Da Silva *et al.*, 2022), que incorporaram variáveis latentes para compreender com maior profundidade as estratégias de aquisição de P pelas plantas.

O uso da MEE em contextos diferenciados é exemplificado pelos trabalhos de Mousavi e colaboradores (Mousavi *et al.*, 2023), que analisaram relações causais em solos áridos e semiáridos, e de Zhao e colaboradores (Zhao *et al.*, 2023), que aplicaram a técnica para avaliar a fertilidade do solo. Em contribuição relevante, Rahman e colaboradores (Rahman *et al.*, 2024) demonstraram que diferentes frações de fósforo, lábil, moderadamente lábil e estável, apresentam contribuições distintas na formação do fósforo reativo solúvel (SRP), evidenciando a complexa rede de interações que governa a dinâmica desse nutriente.

As contribuições mais recentes, como as de Lu e colaboradores (Lu *et al.*, 2025), representam o estado da arte na aplicação da MEE, com descobertas significativas sobre os fatores que influenciam a disponibilidade de P no solo. Esses avanços inserem em um

contexto mais amplo de pesquisas que vêm consolidando a MEE como abordagem robusta e eficaz para o estudo da dinâmica do fósforo em sistemas terrestres.

Especificamente, Gama-Rodrigues e colaboradores (2014) aplicaram a MEE para testar modelos teóricos do ciclo do fósforo, empregando variáveis latentes derivadas da metodologia de fracionamento de Hedley. Nos modelos propostos, foram analisados os impactos diretos das variáveis não observáveis associadas aos reservatórios de fósforo orgânico, inorgânico, ocluso e mineral primário sobre o pool de fósforo disponível. Após ajustes nos modelos, os autores concluíram que o pool de fósforo orgânico, formado pelas frações bicarbonato-Po, hidróxido-Po e sônico-Po, constitui a principal fonte de fósforo para o pool disponível em solos tropicais, confirmando a hipótese inicial (Gama-Rodrigues *et al.*, 2014).

A Modelagem de Equações Estruturais (MEE) estabelece uma ponte entre dados empíricos e conceitos teóricos, por meio de construtos latentes (Neves, 2018). A primeira proposta de modelo estrutural para interpretar as diferentes formas de fósforo (P) em solos tropicais considerou cinco variáveis latentes, denominadas “*Pools de P*”, representadas por múltiplos indicadores (variáveis mensuráveis). Nesse modelo inicial, testaram-se hipóteses sobre os efeitos diretos dos Pools orgânico, inorgânico, ocluso e mineral primário sobre o Pool de P disponível. Contudo, o ajuste não foi satisfatório, pois não houve significância estatística para o Pool disponível em função dos Pools avaliados ( $X^2 = 165,61$ ;  $df = 17$ ;  $p < 0,0001$ ) (Gama-Rodrigues *et al.*, 2014).

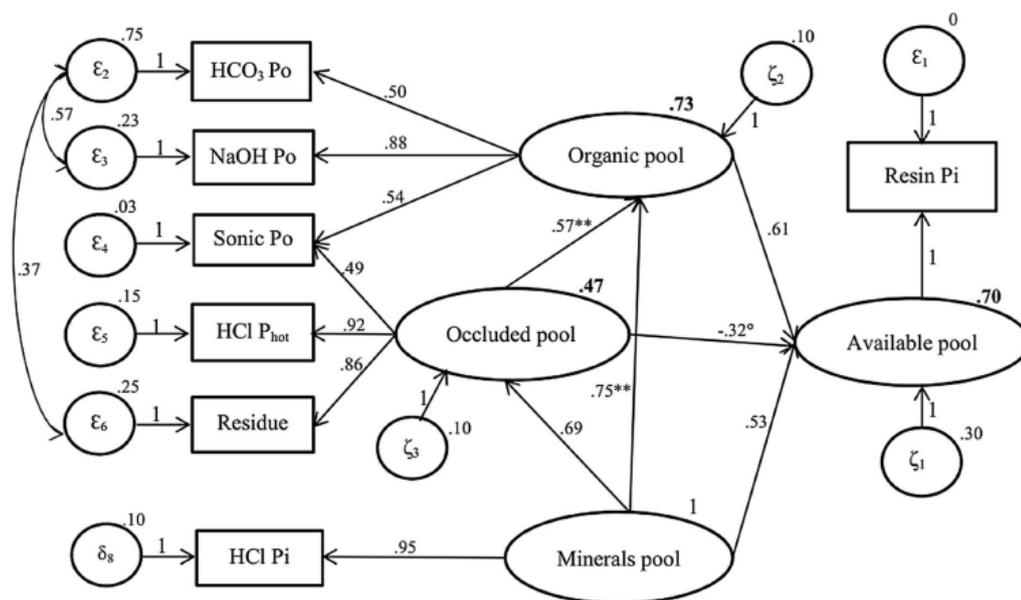
Outro modelo, com dados padronizados e excluindo Pools sem significância como fonte ou dreno do P disponível, apresentou ajuste aprimorado ( $X^2 = 105,13$ ;  $df = 7$ ;  $p < 0,0001$ ), destacando o Pool orgânico como única fonte significativa de P disponível e revelando correlação relevante entre os Pools orgânico e ocluso (Gama-Rodrigues *et al.*, 2014). Em seguida, um modelo ajustado foi testado sem padronização dos dados (variando de 0 a 1), utilizando o método da verossimilhança para estimar os parâmetros. Esse ajuste apresentou melhora significativa ( $X^2 = 46,305$ ;  $df = 17$ ;  $p < 0,0001$ ), evidenciando que os Pools orgânico e mineral primário eram fontes relevantes de P para o Pool disponível (Sales *et al.*, 2015).

No entanto, ao aplicar o mesmo modelo sem padronização e utilizando novamente o método da verossimilhança, obteve-se ajuste ainda melhor, mas sem significância estatística ( $X^2 = 5,93$ ;  $df = 5$ ;  $p = 0,313$ ) (Sales *et al.*, 2015). Mantendo essa abordagem e sem padronização, a inclusão do Pool de minerais primários como fonte de P para o

Pool disponível resultou em índices ajustados satisfatórios ( $X^2 = 10,31$ ;  $df = 8$ ;  $p = 0,244$ ) (Sales *et al.*, 2015).

A partir desses ajustes, foram desenvolvidas versões sucessivas do modelo para aprimorar a representação das relações entre os pools de fósforo. A primeira versão manteve a estrutura básica, mas ainda não estava saturada, apresentando algumas variáveis sem conexão direta. A versão seguinte reintroduziu a relação entre o pool ocluso e o pool disponível, aproximando-se da estrutura teórica original e conferindo maior estabilidade ao modelo, mesmo com um coeficiente de regressão não significativo. Na versão final, o modelo foi reespecificado, incluindo os pools orgânico e ocluso como variáveis endógenas ( $X^2 = 7.02$ ,  $df = 7$ ,  $P = 0,427$ ), estabelecendo relações diretas e indiretas significativas e evidenciando a interdependência entre os pools (Figura 3) (Sales *et al.*, 2015).

De modo geral, a ausência de padronização dos dados, combinada com o método da verossimilhança, proporcionou ajustes superiores em comparação às versões com dados padronizados, reforçando a importância de testes prévios para definir a melhor abordagem conforme as características de cada conjunto de informações.



**Figura 3.** Modelo C2, modelo de equações estruturais para o ciclo do P no solo. Todas as variáveis medidas (em caixas) são descritas como efeito indicadores associados a variáveis latentes (em círculos). Os números indicam os parâmetros padronizados estimados ( $P < 0.001$ ) enquanto os valores do R<sup>2</sup> (números em negrito) indicam a variância explicada para cada variável mensurada. Os símbolos ° e \*\* representam significância estatística a níveis de  $P < 0,1$  e  $0,01$  respectivamente. As variáveis de erro (e1–e6, d8, f1–f3) são valores padronizados. Modelo  $X^2 = 7.02$ ,  $df = 7$ ,  $P = 0,427$  (Fonte: Adaptado de Sales (2015)).

## Referências bibliográficas

ACHARY, V. Mohan M. *et al.* Phosphite: a novel P fertilizer for weed management and pathogen control. **Plant Biotechnology Journal**, v. 15, n. 12, p. 1493–1508, 2017.

ALCARDE, José Carlos. Fertilizantes. *In*: NOVAIS, Roberto Ferreira *et al.* (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa-MG: SBCS, 2007. p. 737–768.

ALI, N. S.; AL-JUTHERY, H. W. A. The application of nanotechnology for micronutrient in agricultural production (review article). **Iraqi Journal of Agricultural Sciences**, v. 48, n. 4, 13 ago. 2017.

ALLEONI, Luis Reynaldo Ferracciú *et al.* Química dos solos altamente intemperizados. **Química e mineralogia do solo. v. 2: aplicações**, p. 685 il, 2016.

ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. *In*: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Orgs.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba/SP: POTAFOS, 2004. p. 537–562.

ARAÚJO, Brilhar *et al.* **Solubilização de fosfatos e potássio por bactérias rizosféricas - uma revisão.** | EBSCOhost. Disponível em: <<https://openurl.ebsco.com/contentitem/doi:10.31413%2Fnat.v12i4.17576?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:doi:10.31413%2Fnat.v12i4.17576>>. Acesso em: 11 ago. 2025.

ARENBERG, Mary R.; LIANG, Xinqiang; ARAI, Yuji. Immobilization of agricultural phosphorus in temperate floodplain soils of Illinois, USA. **Biogeochemistry**, v. 150, n. 3, p. 257–278, 2020.

ASHRAF, M. N. *et al.* Evaluating Organic Materials Coating on Urea as Potential Nitrification Inhibitors for Enhanced Nitrogen Recovery and Growth of Maize (*Zea mays*). **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 22, n. 5, p. 1102–1108, 2019.

AUDETTE, Yuki *et al.* Phosphorus binding to soil organic matter via ternary complexes with calcium. **Chemosphere**, v. 260, p. 127624, 1 dez. 2020.

AZIZ, Tariq *et al.* Phosphorus deficiency in plants: Responses, adaptive mechanisms, and signaling. **Plant Signaling: Understanding the Molecular Crosstalk**, v. 9788132215424, p. 133–148, 1 out. 2014.

BAI, Yong-Chao *et al.* Soil Chemical and Microbiological Properties Are Changed by Long-Term Chemical Fertilizers That Limit Ecosystem Functioning. **Microorganisms**, v. 8, n. 5, p. 694, 8 maio 2020.

BALDOTTO, Maribus Altoé; VELLOSO, Ary Carlos Xavier. Eletroquímica de solos modais e de sua matéria orgânica em ambientes tropicais. **Revista Ceres**, v. 61, n. 6, p. 1012–1021, 2014.

BARBOSA, Kássia de Paula. Fontes e formas de aplicação de fertilizantes fosfatados em cultivos consecutivos de soja em Latossolo de alta fertilidade. nov. 2020.

BARROW, N. J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. **Journal of Soil Science**, v. 34, n. 4, p. 733–750, 1983.

BARROW, N. J. Reaction of Anions and Cations with Variable-Charge Soils. *In: Advances in Agronomy*. [S.l.]: Elsevier, 1986. v. 38 p. 183–230.

BARROW, N. J. Soil phosphate chemistry and the P-sparing effect of previous phosphate applications. **Plant and Soil**, v. 397, n. 1–2, p. 401–409, 2015.

BARROW, N. J. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. **Plant and Soil**, v. 410, n. 1–2, p. 401–410, 2017.

BARROW, N. J. *et al.* The soil phosphate fractionation fallacy. **Plant and Soil**, v. 459, n. 1–2, p. 1–11, 1 fev. 2021.

BASINSKI, Jade J. *et al.* Unraveling iron oxides as abiotic catalysts of organic phosphorus recycling in soil and sediment matrices. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 5930, 18 jul. 2024.

BAZANI, José Henrique. **Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto**. Mestrado em Recursos Florestais—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.

BENNETT, Elena M.; SCHIPANSKI, Meagan E. Chapter 8 - The Phosphorus Cycle. *In: WEATHERS, Kathleen C.; STRAYER, David L.; LIKENS, Gene E. (Orgs.). Fundamentals of Ecosystem Science*. [S.l.]: Academic Press, 2013. p. 159–178.

BOLAN, N. S.; WHITE, R. E.; HEDLEY, M. J. A Review of The Use of Phosphate Rocks As Fertilisers For Direct Application in Australia and New Zealand. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 30, n. 2, p. 297–313, 1990.

BOOMSMA, Anne. Structural Equation Modeling: Foundations and Extensions (Advanced Quantitative Techniques in the Social Sciences Series, Vol. 10.) by David Kaplan. **Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal**, v. 10, n. 2, p. 323–331, abr. 2003.

BORGES, W. L. *et al.* Agronomic efficiency of fertilizers with aggregate technology in the Brazilian Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 18, n. 4, p. 1–7, 31 dez. 2023.

BOWMAN, R. A.; VIGIL, M. F. Soil testing for different phosphorus pools in cropland soils of the Great Plains. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 57, n. 6, p. 479–485, nov. 2002.

BRADY, Nyle C.; WEIL, Ray R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. [S.l.]: Bookman, 2013.

BRAOS, L. B. *et al.* Dynamics of phosphorus fractions in soils treated with dairy manure. **Soil Research**, v. 58, n. 3, p. 289–298, 20 jan. 2020.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 14, n. 4, p. 319–329, 1 jan. 1982.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Phosphorus in the soil microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 16, n. 2, p. 169–175, jan. 1984.

BÜNEMANN, E. K. *et al.* Rapid microbial phosphorus immobilization dominates gross phosphorus fluxes in a grassland soil with low inorganic phosphorus availability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 51, p. 84–95, ago. 2012.

BYRNE, Barbara M. **Structural equation modeling with AMOS: basic concepts, applications, and programming**. Second edition (Online-Ausg.) ed. New York: Routledge, 2010.

CAIONE, Gustavo; PRADO, Renato de Mello. **Nutrição e adubação de pastagens**. [S.l.]: Fcav, 2021.

CAIONE, G., SCHONINGER, E.L., DE SOUSA PEREIRA, H., DE SOUZA MARIA, L., LOURINI, S.H., VILELA, L. (2025). Phosphorus Nutrition in Tropical Pastures. In: de Mello Prado, R., Caione, G. (eds) **Nutrition and fertilization of forage grasses**. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-91903-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-91903-9_11)

CALHEIROS, A. S. *et al.* Nível crítico de fósforo por diferentes extratores químicos em Neossolo Flúvico alcalino cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 7, n. 4, p. 590–596, 5 dez. 2012.

CARMO, Thiago Rezende Lima Do; CABALLERO, Segundo Sacramento Urquiaga; ALVES, Bruno José Rodrigues. Balanço geral de nitrogênio e fósforo na agropecuária brasileira no período de 1990 a 2020. In: ZONTA, Everaldo; PEREIRA, Marcos Gervasio (Eds.). **Agricultura, Mudanças Climáticas e Segurança Alimentar - Anais do VI Simpósio ABC (Argentina-Brasil-Cuba)**. 1. ed. [S.l.]: Atena Editora, 2023. p. 356–361.

CARNEIRO, Leandro Flávio *et al.* Frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um Latossolo com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 483–491, abr. 2011.

CARRINGTON, Damian. Phosphate fertiliser “crisis” threatens world food supply. **The Guardian**, 2019.

CARVALHO, Rui *et al.* Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 3, p. 557–565, 2001.

CEKINSKI, E. Fertilizantes Fosfatados. In: CEKINSKI, E. *et al.* (Eds.). **Tecnologia de Produção de Fertilizantes**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990. p. 95–129.

CHAGAS, Wantuir Filipe Teixeira *et al.* Productive characteristics, nutrition and agronomic efficiency of polymer-coated MAP in lettuce crops. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 2, 2015.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, Baltimore. v. 84, p. 133–144, 1957.

CHEN, C. R. *et al.* Effects of afforestation on phosphorus dynamics and biological properties in a New Zealand grassland soil. **Plant and Soil**, v. 220, n. 1–2, p. 151–163, 2000.

CHIEN, S. H. *et al.* Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 89, n. 2, p. 229–255, 2011.

CHOWDHURY, Rubel Biswas *et al.* Key sustainability challenges for the global phosphorus resource, their implications for global food security, and options for mitigation. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 945–963, jan. 2017.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M. Effects of long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zealand. **Journal of Soil Science**, v. 40, n. 2, p. 383–395, 1989.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by  $^{31}\text{P}$  nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, v. 36, n. 2, p. 199–207, 1985.

CONDRON, L. M.; TIESSEN, H. Interactions of organic phosphorus in terrestrial ecosystems. *In*: TURNER, B. L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. S. (Orgs.). **Organic phosphorus in the environment**. 1. ed. UK: CABI Publishing, 2005. p. 295–307.

CONDRON, Leo M.; NEWMAN, Susan. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, n. 5, p. 830–840, 2011.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 925–930, dez. 2002.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 893–900, out. 2003.

CORRÊA, Rossini Mattos; NASCIMENTO, Clístenes Williams Araújo Do; ROCHA, Alexandre Tavares Da. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 153–159, 2 mar. 2011.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M. Óxidos de ferro. *In*: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e mineralogia do solo**. 1. ed. Viçosa: SBCS, 2009. v. 1 p. 505–572.

COSTA, Karla Samylle De Queiroz *et al.* Fósforo no sistema solo-planta: uma revisão. **Observatório de la economía latinoamericana**, v. 22, n. 6, p. e5361, 20 jun. 2024.

COSTA, Marlon *et al.* Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus Plantations, Brazil. **Forests**, v. 7, n. 1, p. 15, 2016.

CROSS, Anne Fernald; SCHLESINGER, William H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, v. 64, n. 3–4, p. 197–214, 1995.

DA CRUZ, Diego Fernandes *et al.* Role of Polymeric Coating on the Phosphate Availability as a Fertilizer: Insight from Phosphate Release by Castor Polyurethane Coatings. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 29, p. 5890–5895, 26 jul. 2017.

DA SILVA, Erika Caitano *et al.* Does Structural Equation Modeling Provide a Holistic View of Phosphorus Acquisition Strategies in Soils of Amazon Forest? **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 3, p. 3334–3347, set. 2022.

DE FIGUEIREDO, Cícero Célio *et al.* Polymer-coated phosphate fertilizer and liming on the production and morphological parameters of corn. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 43, n. 3, p. 446–452, 2012.

DO NASCIMENTO, Carlos A. C. *et al.* Phosphorus Mobility and Behavior in Soils Treated with Calcium, Ammonium, and Magnesium Phosphates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, n. 3, p. 622–631, 2018.

DONAGEMMA, Guilherme Kangussu *et al.* Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003–1020, 2016.

DUDA, Gustavo Pereira *et al.* Avaliação da biodisponibilidade de fósforo em diferentes classes de solos do Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 4, p. 1563–1576, 30 ago. 2013.

EISENHAUER, Nico *et al.* From patterns to causal understanding: Structural equation modeling (SEM) in soil ecology. **Pedobiologia**, v. 58, n. 2–3, p. 65–72, mar. 2015.

ELSER, James; BENNETT, Elena. A broken biogeochemical cycle. **Nature**, v. 478, n. 7367, p. 29–31, 2011.

EVERAERT, Maarten *et al.* Agronomic Effectiveness of Granulated and Powdered P-Exchanged Mg-Al LDH Relative to Struvite and MAP. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 32, p. 6736–6744, 16 ago. 2017.

FAGERIA, Nand Kumar. **The Use of Nutrients in Crop Plants**. 0. ed. [S.l.]: CRC Press, 2009.

FALCÃO, Newton Paulo De Souza; SILVA, José Risonei Assis Da. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 3, p. 337–342, 2004.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt: Pacote experimental designs.**, 2021.

FIXEN, P. E.; GROVE, J. H. Testing Soils for Phosphorus. *In*: WESTERMAN, R. I. (Ed.). **Soil Testing and Plant Analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 1990. v. 3 p. 141–180.

FOX, John; NIE, Zhenghua; BYRNES, Jarrett. **Sem: Structural equation models**. , 2024. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=sem>>

FOX, Thomas R. *et al.* Phosphorus Nutrition of Forest Plantations: The Role of Inorganic and Organic Phosphorus. *In*: BÜNEMANN, Else; OBERSON, Astrid; FROSSARD, Emmanuel (Orgs.). **Phosphorus in Action**. Soil Biology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. v. 26 p. 317–338.

FREITAS, Idelfonso Colares De. **Atributos de um Neossolo Quartzarênico da pré-Amazônia sob agroecossistemas de produção familiar**. Goiânia-GO: UFG, 2013.

GAMA-RODRIGUES, A. C. *et al.* An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. **Biogeochemistry**, v. 118, n. 1–3, p. 453–469, 17 abr. 2014.

GAO, Shengchao *et al.* Effects of humic acid-enhanced phosphate fertilizer on wheat yield, phosphorus uptake, and soil available phosphorus content. **Crop Science**, v. 63, n. 2, p. 956–966, 1 mar. 2023.

GATIBONI, Luciano Colpo *et al.* Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 691–699, ago. 2007.

GATIBONI, Luciano Colpo *et al.* Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos líquidos de suínos em pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1753–1761, 2008.

GATIBONI, Luciano Colpo; BRUNETTO, Gustavo; KAMINSKI, João. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações. 2013.

GATIBONI, Luciano Colpo; KAMINSKI, João; SANTOS, Danilo Rheinheimer dos. Modificações nas formas de fósforo do solo após extrações sucessivas com Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 363–371, 2005.

GRACE, James B. **Structural Equation Modeling and Natural Systems**. 1. ed. Cambridge: University Press, 2006.

GRACE, James B.; BOLLEN, Kenneth A. Representing general theoretical concepts in structural equation models: the role of composite variables. **Environmental and Ecological Statistics**, v. 15, n. 2, p. 191–213, jun. 2008.

GUEDES, Rafael Silva *et al.* Adsorption and desorption kinetics and phosphorus hysteresis in highly weathered soil by stirred flow chamber experiments. **Soil and Tillage Research**, v. 162, p. 46–54, set. 2016.

GUELFY, Douglas *et al.* Innovative Phosphate Fertilizer Technologies to Improve Phosphorus Use Efficiency in Agriculture. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 21, 1 nov. 2022.

GUELF, Douglas Ramos *et al.* Monoammonium phosphate coated with polymers and magnesium for coffee plants. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 3, p. 261–270, 1 maio 2018.

GUO, Fengmao; YOST, Russell S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Science**, v. 163, n. 10, p. 822–833, 1998.

HAIR, Joseph F. *et al.* Multivariate data analysis (8. Baskı). **Eight Edition, Cengage: Learning EMEA**, 2019.

HAIR JR., Joseph F. *et al.* **Análise Multivariada De Dados**. 6. ed. [S.l.]: Bookman, 2009.

HANSEL, Fernando Dubou. **Fertilizantes fosfatados aplicados a lanço e em linha na cultura da soja sob semeadura direta**. Unpublished, , 2013. Disponível em: <<http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.3641.7529>>. Acesso em: 12 ago. 2025

HANYABUI, Emmanuel *et al.* Phosphorus sorption in tropical soils. **AIMS Agriculture and Food**, v. 5, n. 4, p. 599–616, 2020.

HAVLIN, John L. **Soil Fertility and Fertilizers**. 8. ed. [S.l.]: Pearson India, 2017.

HAWKINS, J. M. B. *et al.* The effect of soil organic matter on long-term availability of phosphorus in soil: Evaluation in a biological P mining experiment. **Geoderma**, v. 423, p. 115965, 1 out. 2022.

HAYNES, R. J.; MOKOLOBATE, M. S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 59, n. 1, p. 47–63, jan. 2001.

HE, Xianjin *et al.* Global patterns and drivers of phosphorus fractions in natural soils. **Biogeosciences**, v. 20, p. 4147–4163, 2023.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in Inorganic and Organic Soil Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 5, p. 970–976, set. 1982.

HELFENSTEIN, Julian *et al.* Soil solution phosphorus turnover: derivation, interpretation, and insights from a global compilation of isotope exchange kinetic studies. **Biogeosciences**, v. 15, n. 1, p. 105–114, 8 jan. 2018.

HINGSTON, F. J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite - I: the role of the proton in determining adsorption envelopes. **Journal of Soil Science**, v. 23, p. 177–191, 1972.

HOU, Enqing *et al.* A structural equation model analysis of phosphorus transformations in global unfertilized and uncultivated soils. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 30, n. 9, p. 1300–1309, set. 2016.

HOU, Enqing *et al.* Solubility of phosphorus in subtropical forest soils as influenced by low-molecular organic acids and key soil properties. **Geoderma**, v. 313, p. 172–180, 1 mar. 2018.

HOYLE, Rick H.; SMITH, Gregory T. Formulating clinical research hypotheses as structural equation models: A conceptual overview. **Journal of Consulting and Clinical Psychology**, v. 62, n. 3, p. 429–440, 1994.

HU, Li-tze; BENTLER, Peter M. Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. **Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal**, v. 6, n. 1, p. 1–55, 1999.

ICHINOSE, Yuri *et al.* How do reactive aluminum and iron phases control soil organic carbon and phosphate adsorption capacity in agricultural topsoils across Japan? **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 71, n. 1, p. 38–52, 2 jan. 2025.

IKHAJIAGBE, Beckley *et al.* RETRACTED: Major phosphorus in soils is unavailable, yet critical for plant development. **Notulae Scientia Biologicae**, v. 12, n. 3, p. 500–535, 29 set. 2020.

IRIONDO, José M.; ALBERT, María J.; ESCUDERO, Adrián. Structural equation modelling: an alternative for assessing causal relationships in threatened plant populations. **Biological Conservation**, v. 113, n. 3, p. 367–377, out. 2003.

JASINSKI, Stephen. **Phosphate Rock, Mineral Commodity Summaries 2025**. , 2025.

JASINSKI, Stephen M. **Phosphate Rock, Mineral Commodity Summaries 2021**. , 2021.

JOLLIFFE, I. T. **Principal Component Analysis**. New York: Springer-Verlag, 2002.

JÖRESKOG, Karl G.; SÖRBOM, Dag. Recent Developments in Structural Equation Modeling. **Journal of Marketing Research**, v. 19, n. 4, p. 404–416, nov. 1982.

KAFLE, Arjun *et al.* Harnessing Soil Microbes to Improve Plant Phosphate Efficiency in Cropping Systems. **Agronomy**, v. 9, n. 3, p. 127, 8 mar. 2019.

KAISER, Henry F. The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 141–151, abr. 1960.

KAPLAN, D. **Structural equation modeling: foundations and extensions**. Thousand Oaks, California: Sage Publications, 2000. v. 10

KASSEM, Ihsane *et al.* Biodegradable all-cellulose composite hydrogel as eco-friendly and efficient coating material for slow-release MAP fertilizer. **Progress in Organic Coatings**, v. 162, p. 106575, 1 jan. 2022.

KLINE, Rex B. **Principles and practice of structural equation modeling, 4th ed**. New York, NY, US: The Guilford Press, 2016. p. xvii, 534

KLOTZBÜCHER, Anika *et al.* Testing mechanisms underlying the Hedley sequential phosphorus extraction of soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 182, n. 4, p. 570–577, ago. 2019.

KORKMAZ, Selcuk; GOKSULUK, Dincer; ZARARSIZ, Gokmen. MVN: An R Package for Assessing Multivariate Normality. **The R Journal**, v. 6, n. 2, p. 151, 2014.

KOUR, Divjot *et al.* Biodiversity, current developments and potential biotechnological applications of phosphorus-solubilizing and -mobilizing microbes: A review. **Pedosphere**, v. 31, n. 1, p. 43–75, fev. 2021.

LÊ, Sébastien; JOSSE, Julie; HUSSON, François. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, p. 1–18, 2008.

LEHNINGER, Albert L. **Short course in biochemistry**. New York: Worth Publishers, 1973.

LEITE, Jacqueline Nayara Ferraça *et al.* Frações orgânicas e inorgânicas do fósforo no solo influenciadas por plantas de cobertura e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 11, p. 1880–1889, nov. 2016.

LIMA, Regina Lúcia Félix De Aguiar. Micorrizas arbusculares e absorção de fósforo em função da capacidade de fixação de fósforo do solo e da competição com a microbiota. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1062–1079, 1 jun. 2020.

LINDSAY, W. L.; LEHR, J. R.; STEPHENSON, H. F. Nature of the Reactions of Monocalcium Phosphate Monohydrate in Soils: III. Studies with Metastable Triple-Point Solution. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 5, p. 342–345, 1959.

LINDSAY, W. L.; STEPHENSON, H. F. Nature of the Reactions of Monocalcium Phosphate Monohydrate in Soils: II. Dissolution and Precipitation Reactions Involving Iron, Aluminum, Manganese, and Calcium. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 1, p. 18–22, 1959.

LINDSAY, Willard L. **Chemical Equilibria in Soils**. New York: John Wiley & Sons, 1979.

LISHINSKI, Alex. lavaanPlot: Path diagrams for Lavaan models via DiagrammeR. **R package version 0.6**, v. 2, p. 2021, 2021.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; CUNHA, J. F. da. **Superfosfato Simples**. São Paulo: Gráfica Nagy, 2010.

LU, Chun *et al.* Phosphorus Dynamics in Managed and Natural Soils: SEM-PLS Analysis of Vaccinium, Forest, and Grassland Ecosystems. **Plants**, v. 14, n. 2, p. 189, jan. 2025.

LUO, Yuan-Jun; YUAN, Da-Gang; HUANG, Lai-Ming. Soil phosphorus fraction and availability dynamics along a 2-million-year soil chronosequence in northern Hainan Island, China. **Geoderma**, v. 448, p. 116957, ago. 2024.

MACDONALD, Graham K. *et al.* Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 7, p. 3086–3091, 2011.

MALAVOLTA, E. *et al.* Estudos sobre a nutrição mineral do arroz: XV. absorção radicular e foliar do radiofósforo pelas variedades IAC-47 e IAC-435. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 38, n. 2, p. 695–721, 1981.

MARSCHNER, Horst. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed ed. London Waltham, MA: Academic Press, 2012.

MARTINAZZO, Rosane *et al.* Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 563–570, jun. 2007.

MCLAREN, Timothy I. *et al.* The chemical nature of organic phosphorus that accumulates in fertilized soils of a temperate pasture as determined by solution<sup>31</sup>P NMR spectroscopy. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 180, n. 1, p. 27–38, fev. 2017.

MIGNACCA, Flávia Alessandra. **Fracionamento de fósforo de um Argissolo Vermelho distroférico submetido a manejos de correção e adubação em sistema de integração lavoura-pecuária**. 2016. Universidade do Oeste Paulista, UNOESTE, Brasil, 2016. Disponível em: <<http://bdt.unoeste.br:8080/jspui/handle/jspui/1046>>

MIHAILESCU, E. *et al.* Phosphorus balance and use efficiency on 21 intensive grass-based dairy farms in the South of Ireland. **The Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 3, p. 520–537, 2015.

MIRABELLO, M. J. *et al.* Soil phosphorus responses to chronic nutrient fertilisation and seasonal drought in a humid lowland forest, Panama. **Soil Research**, v. 51, n. 3, p. 215, 2013.

MIRANDA, Li Chaves. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados de diferentes tempos de liberação aplicados em solos de textura contrastante**. Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal—[S.l.]: UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI, 2023.

MITCHELL, R. J. Testing Evolutionary and Ecological Hypotheses Using Path Analysis and Structural Equation Modelling. **Functional Ecology**, v. 6, n. 2, p. 123, 1992.

MME. **Relatório Técnico 54 - Perfil do Enxofre**. Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2009.

MOREIRA, A. *et al.* Avaliação da disponibilidade do fósforo no solo por métodos isotópico, químicos e biológico. **Scientia Agricola**, v. 54, p. 1–2, 1997.

MOREIRA, Fatima Maria De Souza; SIQUEIRA, Jose Oswaldo. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. [S.l.]: Editora da UFLA, 2006.

MOUSAVI, Seyed Roohollah *et al.* Cause-effect relationships using structural equation modeling for soil properties in arid and semi-arid regions. **CATENA**, v. 232, p. 107392, 1 nov. 2023.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, p. 31–36, 1962.

NEVES, Jorge Alexandre Barbosa. **Modelo de equações estruturais: uma introdução aplicada**. 2018.

NOVAIS, R. F.; KAMPRATH, E. J. Parametros das isotermas de adsorcao de fosforo como criterio de recomendacao de adubacao fosfatada. Parte de tese. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 3, 1979.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999.

NOVAIS, Roberto Ferreira; SMYTH, T. Jot; NUNES, Flancer Novais. Fósforo. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa-MG: [S.n.]. p. 471–550.

NUNES, Ana Paula Pereira; SANTOS, César Ferreira; GUELFY, Douglas. Interfaces between biodegradable organic matrices coating and MAP fertilizer for improve use efficiency. **Science of The Total Environment**, v. 804, p. 149896, 15 jan. 2022.

NUNES, Rafael de Souza *et al.* Distribution of Soil Phosphorus Fractions as a Function of Long-Term Soil Tillage and Phosphate Fertilization Management. **Frontiers in Earth Science**, v. 8, p. 350, 2 set. 2020.

OLIVEIRA, Lara Caroline Alves De *et al.* Frações de fósforo em função do uso de fertilizantes fosfatados em distintas classes de solo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 4, p. 1–15, 2021.

OLIVEIRA, Maiara Prates; MALAGOLLI, Guilherme Augusto; CELLA, Daltro. MERCADO DE FERTILIZANTES: dependência de importações do Brasil. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 1, p. 489–498, 2019.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A. *et al.* **Recomendação agrônômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho**. - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1120362/recomendacao-agronomica-de-cepas-de-bacillus-subtilis-cnpms-b2084-e-bacillus-megaterium-cnpms-b119-na-cultura-do-milho>>. Acesso em: 11 ago. 2025.

PARFITT, R. L. Anion Adsorption by Soils and Soil Materials. *In*: **Advances in Agronomy**. [S.l.]: Elsevier, 1978. v. 30 p. 1–50.

PAULY, D. G.; MALHI, S. S.; NYBORG, M. Controlled-release P fertilizer concept evaluation using growth and P uptake of barley from three soils in greenhouse. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 82, n. 2, p. 201–210, 1 maio 2002.

PAVINATO, Paulo S. *et al.* Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports 2020 10:1**, v. 10, n. 1, p. 1–11, 28 set. 2020.

PAVINATO, Paulo Sérgio. **Dinâmica do fósforo no solo em função do manejo e da presença de resíduos em superfície**. Tese (Doutorado em Agronomia-Agricultura)—Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 2007.

PENN, Chad; CAMBERATO, James. A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. **Agriculture**, v. 9, n. 6, p. 120, 8 jun. 2019.

PEREIRA, Suziane dos Santos. **Modelagem de Equações Estruturais no Software R**, 2013.

PESSOA-DE-SOUZA, Marco Aurélio *et al.* Comportamento químico de Nossolos Quartzarênicos em Mineiros, sudoeste goiano. **Geosciences = Geociências**, v. 34, n. 3, p. 335–347, 24 jul. 2015.

PIERZYNSKI, Gary M.; MCDOWELL, Richard W.; THOMAS SIMS, J. Chemistry, Cycling, and Potential Movement of Inorganic Phosphorus in Soils. *In*: THOMAS SIMS, J.; SHARPLEY, Andrew N. (Orgs.). **Agronomy Monographs**. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 2005. p. 51–86.

PILATI, Ronaldo; LAROS, Jacob Arie. Modelos de equações estruturais em psicologia: conceitos e aplicações. **Psicologia: Teoria e Pesquisa**, v. 23, n. 2, p. 205–216, jun. 2007.

PIZZEGHELLO, Diego *et al.* Bioactivity of Size-Fractionated and Unfractionated Humic Substances From Two Forest Soils and Comparative Effects on N and S Metabolism, Nutrition, and Root Anatomy of *Allium sativum* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1203, 14 ago. 2020.

PROCHNOW, Luíz Ignácio; ALCARDE, José Carlos; CHIEN, Sen Hsuing. Eficiência agrônômica dos fosfatos totalmente acidulados. *In*: YAMADA, Tsuioshi; ABDALLA, Silvia Regina Stipp (Eds.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba-SP: POTAFOS, 2004. p. 605–654.

R CORE TEAM. **R: O Projeto R para Computação Estatística**. ViennaR Foundation for Statistical Computing, , 2021. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 14 ago. 2025

RAFIQUE, Mazhar *et al.* Residual effects of biochar and phosphorus on growth and nutrient accumulation by maize (*Zea mays* L.) amended with microbes in texturally different soils. **Chemosphere**, v. 238, 1 jan. 2020.

RAHMAN, Mohammad A. *et al.* Soil Phosphorus Partition and Transformations Under Diverse Land Uses. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 55, n. 15, p. 2232–2247, 21 ago. 2024.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. [S.l.]: Editora Agronômica Ceres, 1991.

RAIJ, B. van. *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996.

RAIJ, B. van. Fósforo no solo e interação com outros elementos. *In*: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Eds.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato, 2004.

REDEL, Y. *et al.* Assessment of phosphorus status influenced by Al and Fe compounds in volcanic grassland soils. **Journal of soil science and plant nutrition**, n. ahead, p. 0–0, 2016.

REETZ JR, Harold F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. Paris: International Fertilizer industry Association - IFA, 2016.

REVELLE, William. **psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research**. Northwestern University, Evanston, Illinois., 2025. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=psych>>. Acesso em: 26 set. 2025

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Bras. Ci. Solo**, v. 24, p. 589–597, 2000.

RICHARDSON, A. E. Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. **Functional Plant Biology**, v. 28, n. 9, p. 897–906, 2001.

RIVAIE, A. A. *et al.* Effect of phosphate rock and triple superphosphate on soil phosphorus fractions and their plant-availability and downward movement in two volcanic ash soils under *Pinus radiata* plantations in New Zealand. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 82, n. 1, p. 75–88, set. 2008.

RODRIGUES, Marcos *et al.* Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104770, 2020.

ROLIM NETO, F. C. *et al.* Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 953–964, dez. 2004.

ROSSEEL, Yves. lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling. **Journal of Statistical Software**, v. 48, p. 1–36, 24 maio 2012.

ROY, Eric D. *et al.* The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, v. 2, n. 5, p. 16043, 18 abr. 2016.

SAENTHO, Apinya *et al.* Speciation and pH- and particle size-dependent solubility of phosphorus in tropical sandy soils. **Geoderma**, v. 408, p. 115590, fev. 2022.

SALES, Marcus Vinicius da silva. **Modelagem de equações estruturais aplicada ao estudo do ciclo do P em solos tropicais**. Campus Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2015.

SALES, M. V. S. *et al.* Respecification of structural equation models for the P cycle in tropical soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 102, n. 3, p. 347–358, 23 jul. 2015.

SALES, Marcus V. S. *et al.* Structural equation modeling for the estimation of interconnections between the P cycle and soil properties. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 109, n. 2, p. 193–207, 1 nov. 2017.

SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. Reactions of Phosphate Fertilizers in Soils. *In: ASA, CSSA, and SSSA Books*. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1980. p. 263–310.

SANTORO, Veronica; SCHIAVON, Michela; CELI, Luisella. Role of soil abiotic processes on phosphorus availability and plant responses with a focus on strigolactones in tomato plants. **Plant and Soil**, v. 494, n. 1, p. 1–49, 1 jan. 2024.

SANTOS, Danilo Rheinheimer dos; GATIBONI, Luciano Colpo; KAMINSKI, João. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 576–586, abr. 2008.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília-DF: EMBRAPA, 2018.

SANTOS, José Zilton Lopes *et al.* Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 705–714, abr. 2008.

SARKAR, Abhijit *et al.* Polymer coated novel controlled release rock phosphate formulations for improving phosphorus use efficiency by wheat in an Inceptisol. **Soil and Tillage Research**, v. 180, p. 48–62, ago. 2018.

SATO, Shinjiro *et al.* Biogenic calcium phosphate transformation in soils over millennial time scales. **Journal of Soils and Sediments**, v. 9, n. 3, p. 194–205, jun. 2009.

SCHOLZ, Roland W. *et al.* The dynamics of increasing mineral resources and improving resource efficiency: Prospects for mid- and long-term security of phosphorus supply. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 213, p. 107993, 1 fev. 2025.

SCHREIBER, James B. *et al.* Reporting Structural Equation Modeling and Confirmatory Factor Analysis Results: A Review. **The Journal of Educational Research**, v. 99, n. 6, p. 323–338, 1 jul. 2006.

SHEN, Jianbo *et al.* Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997–1005, jul. 2011.

SHEN, Jianbo *et al.* Innovations of phosphorus sustainability: implications for the whole chain. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 6, n. 4, p. 321, 2019.

SHIGAKI, Francirose. **Transporte de fósforo na enxurrada superficial em função do tipo de fonte de P e intensidade das chuvas: Relevância à gerência ambiental em sistemas de produção brasileiros**. Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 1 set. 2006.

SHREVE, Randolph Norris; BRINK, Joseph A. **Indústrias de processos químicos**. 4. ed ed. Rio de Janeiro (RJ): Guanabara, 1997.

SILVA, Erika Caitano da. **Modelagem de equações estruturais no ciclo do fósforo no solo e estratégias de aquisição em solos de diferentes pedogêneses**. Campus Goytacazes-RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2021.

SILVA, Edson Cabral Da *et al.* Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 353–362, 2005.

SILVA, F. C. **Manual De Análises Químicas De Solos, Plantas E Fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

SOUSA, Djalma Martinhão Gomes de; LOBATO, Edson. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília-DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004.

SOUZA, A. E.; FONSECA, D. S. **Fosfato**. Brasília: DNPM, , 2017.

SOUZA FILHO, Luiz Francisco da Silva. **Formas de fósforo em Latossolo sob Cerrado em função do tempo de uso agrícola**. tese de doutorado—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.

SOUZA JÚNIOR, Reginaldo Fidelis De *et al.* Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 159–170, fev. 2012.

SPARKS, Donald L. Environmental Soil Chemistry: An Overview. *In*: SPARKS, Donald L. (Org.). **Environmental Soil Chemistry (Second Edition)**. Burlington: Academic Press, 2003. p. 1–42.

SPOHN, Marie; KUZYAKOV, Yakov. Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 61, p. 69–75, jun. 2013.

STAUFFER E *et al.* **Enhanced efficiency phosphate fertilizers and phosphorus availability in Acrudox**. Disponível em: <<https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.338268665037949>>. Acesso em: 5 jun. 2023.

SUGIHARA, Soh *et al.* Soil phosphorus of stable fraction differentially associate with carbon in the tropical forest and savanna of eastern Cameroon. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 63, n. 6, p. 616–627, 2 nov. 2017.

SYERS, John K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, Denis. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008.

TAKAHASHI, Shigeru; ANWAR, Muhuddin R. Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. **Field Crops Research**, v. 101, n. 2, p. 160–171, mar. 2007.

TANG, Zhi *et al.* Mechanisms and Implications of Phosphate Retention in Soils: Insights from Batch Adsorption Experiments and Geochemical Modeling. **Water**, v. 17, n. 7, p. 998, 28 mar. 2025.

TEIXEIRA, Rafael da Silva *et al.* Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 16, n. 4, p. 1097–1112, 2016.

TIAN, Huixia *et al.* Structural Equation Modeling of Phosphorus Transformations in Soils of *Larix principis-rupprechtii* Mayr. Plantations. **Forests**, v. 14, n. 9, p. 1811, set. 2023.

TIECHER, Tales *et al.* Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 271–282, fev. 2012.

TIECHER, Tales *et al.* Cover Crops Affecting Soil Phosphorus Dynamic in Brazilian Highly Weathered Soils. *In*: REUTER, Jonah (Ed.). **Cover Crops: Cultivation, Management and Benefits**. Hauppauge, New York: Nova Science Publishers Inc, 2016.

TIESSEN, H.; MOIR, J. O. Characterization of Available P by Sequential Extraction. *In*: CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G. (Eds.). **Soil Sampling and Methods of Analysis**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. p. 293–306.

TIESSEN, Holm. Phosphorus Dynamics in Tropical Soils. *In*: THOMAS SIMS, J.; SHARPLEY, Andrew N. (Orgs.). **Agronomy Monographs**. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 2005. p. 253–262.

TOKURA, Alessandra Mayumi *et al.* Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 1, p. 9–16, 2007.

TOKURA, Alessandra Mayumi *et al.* Dinâmica das formas de fósforo em solos de textura e mineralogia contrastantes cultivados com arroz. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 171–179, 2011.

TURNER, Benjamin L.; HAYGARTH, Philip M. Phosphorus solubilization in rewetted soils. **Nature**, v. 411, n. 6835, p. 258, 2001.

VAN KAUFENBERGH, S. J. **World Phosphate Rock Reserves and Resources**. Muscle Shoals: IFDC, 2010.

VIANA, Selma Ferreira *et al.* Variabilidade espacial dos atributos químicos em terra preta de índio cultivada na região de Novo Aripuanã, AM. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 3, p. 53–58, 14 ago. 2016.

VIANA, Tarciana de Oliveira. **Frações de fósforo sob diferentes usos e classes de solo na região sul da Bahia**. Tese de doutorado—CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2016.

VIEIRA, Nilson Darlan. **Resposta da soja a fontes e doses de fósforo em solos com diferentes teores de argila**.

VOGEL, Christian *et al.* Uranium and thorium species in phosphate rock and sewage sludge ash based phosphorus fertilizers. **Journal of Hazardous Materials**, v. 382, p. 121100, jan. 2020.

VOLF, Marcelo R.; ROSOLEM, Ciro A. Soil P Diffusion and Availability Modified by Controlled-Release P Fertilizers. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 1, p. 162–172, 1 mar. 2021.

WALKER, T. W.; SYERS, J. K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, v. 15, n. 1, p. 1–19, 1976.

WANG, Yuan *et al.* Soil phosphorus availability and fractionation in response to different phosphorus sources in alkaline and acid soils: a short-term incubation study. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 5677, 7 abr. 2023.

WEIL, Ray R.; BRADY, Nyle C. **The nature and properties of soils**. Fifteenth edition, global edition ed. Harlow, England London New York: Pearson, 2017.

WITHERS, Paul J. A. *et al.* Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 2537, 7 fev. 2018.

WRIGHT, Sewall. The Method of Path Coefficients. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 5, n. 3, p. 161–215, 1934.

WU, Ping *et al.* A scientometric review of biochar research in the past 20 years (1998–2018). **Biochar** 2019 1:1, v. 1, n. 1, p. 23–43, 27 mar. 2019.

YI, Chenxu *et al.* Speciation of Iron and Aluminum in Relation to Phosphorus Sorption and Supply Characteristics of Soil Aggregates in Subtropical Forests. **Forests**, v. 14, n. 9, p. 1804, 4 set. 2023.

ZAMUNER, E. C.; PICONE, L. I.; ECHEVERRIA, H. E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. **Soil and Tillage Research**, v. 99, n. 2, p. 131–138, 2008.

ZAPATA, F.; ROY, R. N. **Use of phosphate rocks for sustainable agriculture**. Rome: FAO, 2004.

ZHANG, Hongzhi; SHI, Leilei; FU, Shenglei. Effects of nitrogen deposition and increased precipitation on soil phosphorus dynamics in a temperate forest. **Geoderma**, v. 380, p. 114650, 2020.

ZHANG, Shugang *et al.* Biowaste-derived, nanohybrid-reinforced double-function slow-release fertilizer with metal-adsorptive function. **Chemical Engineering Journal**, v. 450, p. 138084, 2022.

ZHAO, Wenfei *et al.* Novel Weighting Method for Evaluating Forest Soil Fertility Index: A Structural Equation Model. **Plants**, v. 12, n. 2, p. 410, 15 jan. 2023.

ZHU, Jing; LI, Min; WHELAN, Mick. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. **Science of The Total Environment**, v. 612, p. 522–537, 15 jan. 2018.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Avaliar a eficiência de aditivos no revestimento dos fertilizantes fosfatados sobre a redução das perdas de P em diferentes classes de solos.

### 2.2 Objetivos específicos

- a. Comparar fontes fosfatadas (MAP vs ST) e o efeito de aditivos (IFCoat, KimcoatBioHP<sup>®</sup> e ausência) quanto à distribuição do P entre frações inorgânicas e orgânicas do solo (Hedley adaptado), em três classes (LVAwf, NVe, RQo) ao longo de 30, 90, 180, 270 e 360 dias;
- b. Avaliar o efeito de fontes fosfatadas (MAP vs ST) e aditivos (IFCoat, KimcoatBioHP<sup>®</sup> e ausência) sobre a manutenção do P em formas lábeis (Pi-solução, Pi-Lábil e Po-Lábil) e a contenção de perdas para frações menos disponíveis (Pi-Fe+Al, Pi-Ca, Pi-NLábil, Pi-ocluso, Po-MLábil, Po-NLábil);
- c. Quantificar interações Fertilizante × Aditivo (e Fatorial × Controle) sobre cada fração de P, identificando combinações mais eficientes por solo;
- d. Caracterizar a trajetória temporal (“cinética”) das frações de P, estimando janelas críticas em que aditivos/fonte maximizam P em solução e lábil e minimizam precipitação/oclusão;
- e. Investigar o papel da microbiota (Po-mic) e de pools orgânicos (Po-lábil, Po-MLábil, Po-NLábil) na imobilização temporária do P e sua liberação posterior à solução (ciclagem).
- f. Identificar mecanismos de fixação (adsorção específica em Fe/Al, precipitação com Ca, oclusão) e como são modulados por fonte e aditivos em cada classe de solo;
- g. Integrar os resultados via Modelagem de Equações Estruturais (MEE) para inferir relações causais entre Pools latentes (Orgânico, Inorgânico, Mineral, Ocluso,

Disponível) e quantificar a contribuição de cada pool para o P disponível, comparando solos e grupos de tratamentos;

- h. Validar tecnologias em condições de campo (soja e milho), estimando eficiência de uso de P (PUE) e respostas agronômicas (produtividade/índices fisiológicos).

### 3. CAPÍTULO I

## Fertilizantes Fosfatados Associados a Aditivos em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf)

#### **Resumo:**

A baixa disponibilidade de fósforo (P) em solos tropicais é um dos principais fatores limitantes à produtividade agrícola, devido à elevada capacidade desses solos de adsorver e imobilizar o nutriente em formas pouco acessíveis às plantas. Nesse contexto, o presente capítulo apresenta os resultados de um experimento conduzido em casa de vegetação com o objetivo de avaliar a dinâmica das frações de fósforo (P) em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf) submetido à aplicação de fontes de fertilizantes fosfatados e aditivos. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso em esquema fatorial  $2 \times 3 + 1$ , em que foram testadas duas fontes de P – monoamônio fosfato (MAP) e superfosfato triplo (ST) – associadas ou não aos aditivos KimcoatBioHP® e IFCoat, além de um tratamento controle. As frações de P no solo, determinadas pelo método de fracionamento sequencial de Hedley, foram quantificadas aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após a instalação do experimento, abrangendo formas inorgânicas (solução, lábil, não lábil, ocluso e precipitados) e orgânicas (biomassa microbiana, lábil, moderadamente e não lábil). O LVAwf apresentou elevada capacidade de fixação do fósforo, refletindo o predomínio de óxidos de ferro e alumínio e o avançado grau de intemperismo. O MAP associado aos aditivos, principalmente IFCoat, manteve maiores teores de P em solução e em frações lábeis entre 90 e 180 dias, reduzindo as perdas por precipitação com Fe e Al e retardando a conversão para formas menos disponíveis. Os aditivos também favoreceram a manutenção de formas lábeis e o estímulo à ciclagem biológica, evidenciado pelo aumento das frações de P orgânico lábil e da biomassa microbiana. Em contraste, o ST apresentou dissolução mais lenta e maior retenção em formas Pi-Ca e Pi-NLábil. De forma geral, o manejo mais eficiente para o LVAwf envolve o uso de fontes solúveis, como o MAP, associadas a aditivos de liberação controlada, como o IFCoat, capazes de equilibrar os processos químicos e biológicos e prolongar a disponibilidade do P no solo. Esse manejo inteligente amplia a eficiência agrônômica e contribui para o uso sustentável do fósforo em solos tropicais altamente intemperizados.

**Palavras-chave:** eficiência de fertilizantes; aditivos agrícolas; disponibilidade de P; fracionamento de P; manejo sustentável de nutrientes.

#### **Abstract:**

Low phosphorus (P) availability in tropical soils is one of the main constraints to crop productivity due to the high capacity of these soils to adsorb and immobilize the nutrient in forms with limited plant accessibility. This study evaluated the dynamics of P fractions

in an Acriferric Red-Yellow Latosol (LVAwf) under the application of phosphate fertilizers combined with controlled-release additives. The experiment was carried out in a greenhouse for 360 days using a completely randomized  $2 \times 3 + 1$  factorial design, with two P sources—monoammonium phosphate (MAP) and triple superphosphate (TSP)—combined with the additives KimcoatBioHP<sup>®</sup> and IFCoat, in addition to an untreated control. Soil P fractions were quantified at 30, 90, 180, 270, and 360 days after installation using the sequential fractionation method of Hedley, covering inorganic (solution, labile, non-labile, occluded, and precipitated) and organic (microbial biomass, labile, moderately labile, and non-labile) forms. The LVAwf exhibited a high P-fixing capacity, reflecting the predominance of Fe and Al oxides in the clay fraction and the advanced degree of weathering. MAP combined with the additives, particularly IFCoat, maintained higher levels of P in solution and labile forms between 90 and 180 days, reducing losses by precipitation with Fe and Al and delaying conversion into less available forms. The additives also favored the maintenance of labile forms and enhanced biological cycling, as indicated by increases in labile organic P and microbial biomass. In contrast, TSP showed slower dissolution and greater retention in Pi-Ca and Pi-nonlabile forms. Overall, the most effective management for the LVAwf involves the use of soluble P sources, such as MAP, associated with controlled-release additives like IFCoat, which help balance chemical and biological processes and prolong P availability in the soil. This intelligent management strategy enhances agronomic efficiency and contributes to the sustainable use of phosphorus in highly weathered tropical soils.

**Keywords:** fertilizer efficiency; agricultural additives; phosphorus availability, P fractionation; sustainable nutrient management.

### 3.1 Introdução

O fósforo (P) é essencial para o crescimento vegetal e a produtividade agrícola, desempenhando papéis estruturais e metabólicos fundamentais nas plantas (Bai *et al.*, 2020; Kafle *et al.*, 2019; Lehninger, 1973). Apesar de ser o décimo segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, o fósforo é o segundo nutriente mais limitante em solos tropicais, por causa da alta capacidade de reter o elemento em seus colóides, reduzindo a absorção pelas plantas, particularmente em solos tropicais altamente intemperizados, como o Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf) (Guedes *et al.*, 2016; Novais; Smyth, 1999; Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000; Shen *et al.*, 2011). Essa retenção eleva os custos de produção, uma vez que é necessário aplicar maiores quantidades de fertilizante para suprir tanto as necessidades das culturas quanto as perdas por imobilização no solo (Guedes *et al.*, 2016; Novais; Smyth; Nunes, 2007). Além disso, o P é um recurso geograficamente restrito, não renovável e finito, reforçando a necessidade de estratégias eficientes de manejo (Achary *et al.*, 2017; Chowdhury *et al.*, 2017; Elser; Bennett, 2011).

A aplicação de fertilizantes fosfatados libera rapidamente fosfato na solução do solo, com intensidade e velocidade dependentes da fonte. O monoamônio fosfato (MAP)

dissolve-se completamente, liberando simultaneamente fosfato e amônio, enquanto o superfosfato triplo (ST) apresenta dissolução parcial, liberando fosfato e formando fosfato bicálcico (Lindsay; Lehr; Stephenson, 1959; Lindsay; Stephenson, 1959; Lindsay, 1979; Reetz Jr, 2016). Parte do P liberado é adsorvida pelos coloides minerais, formando frações lábeis (reversíveis) e, com o tempo, complexos de esfera interna de alta energia, mononucleados ou binucleados, e formas oclusas, aprisionadas em óxidos de Fe e Al (Barrow, 1983; Hingston; Posner; Quirk, 1972; Novais; Smyth, 1999; Parfitt, 1978; Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008; Souza Júnior *et al.*, 2012; Weil; Brady, 2017).

Em solos ácidos como os Latossolos, predomina a precipitação com Fe e Al, formando compostos pouco solúveis, enquanto a interação com  $\text{Ca}^{2+}$  favorece a formação de fosfato monocálcico, relativamente disponível, embora possa evoluir para formas menos solúveis (Havlin, 2017; Raij, 1991). Nesse contexto, a aplicação de aditivos em fertilizantes fosfatados pode reduzir perdas por precipitação e prolongar a disponibilidade de P na fração trocável, especialmente nos primeiros dias após a aplicação, críticos para culturas anuais (Guelfi *et al.*, 2022, 2018; Teixeira *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2022).

O fósforo também é incorporado às formas orgânicas do solo pela ação da microbiota, que realiza mineralização e imobilização reguladas pela relação C/P. Frações orgânicas lábeis e moderadamente lábeis podem retornar gradualmente à solução do solo, constituindo um legado de P disponível, enquanto frações não lábeis contribuem para o estoque de longo prazo (Brookes; Powlson; Jenkinson, 1982; He *et al.*, 2023; Novais; Smyth, 1999; Pavinato, 2007).

Apesar dessas transformações, as taxas de recuperação de P pelas plantas são baixas devido à forte adsorção nos coloides do solo (Guedes *et al.*, 2016). Estratégias como fertilizantes de liberação controlada, nano-P e revestimentos com polímeros ou quelatos têm sido propostas para reduzir imobilização e aumentar a disponibilidade do nutriente (Chagas *et al.*, 2015; Da Cruz *et al.*, 2017; Guelfi *et al.*, 2022, 2018; McLaren *et al.*, 2017; Sarkar *et al.*, 2018; Shen *et al.*, 2019; Teixeira *et al.*, 2016)

Portanto, compreender a dinâmica do fósforo, incluindo a interação entre fertilizantes, aditivos, microbiota e características químico-físicas do solo, é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo que aumentem a eficiência do uso do nutriente e promovam uma agricultura mais sustentável, especialmente em solos tropicais altamente intemperizados, em que a fração de fósforo lábil é rapidamente convertida em formas menos disponíveis.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de fertilizantes fosfatados aplicados em conjunto com aditivos em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf), incubado por um ano sob condições de umidade controlada, visando compreender os efeitos dos aditivos sobre a disponibilidade de fósforo, por meio da dinâmica das frações, e seu potencial de uso pelas plantas.

### 3.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação nas dependências do IF Goiano – Campus Rio Verde (GO), durante 360 dias. Utilizou-se um Latossolo Vermelho-Amarelo acriférrico (LVAwf) (Santos *et al.*, 2025), com amostras coletadas na profundidade correspondente ao horizonte diagnóstico Bw<sub>2</sub> (0,80–1,25 m). A caracterização granulométrica e mineralógica é apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Caracterização granulométrica e mineralógica dos horizontes superficiais do Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf)<sup>1</sup>.

Características		
Solo	-	LVAwf
Cidade/Estado	-	Patrocínio/MG
Coordenadas	-	18°53'5,6"S 46°49'40"W
Horizonte	-	Bw2
Profundidade	m	0,80 a 1,25
Areia	g kg <sup>-1</sup>	160
Silte	g kg <sup>-1</sup>	160
Argila	g kg <sup>-1</sup>	680
SiO <sub>2</sub>	g kg <sup>-1</sup>	8,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	g kg <sup>-1</sup>	36,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	g kg <sup>-1</sup>	6,3
Ki*	-	0,37
Kr**	-	0,34
$\frac{Al_2O_3^{4***}}{Fe_2O_3}$		9,17
Mineralogia da fração Argila <sup>2</sup>	-	Ct, Gb, Gt, Qz e An

<sup>1</sup>(Santos *et al.*, 2018); \*Ki =  $\%SiO_2 \times 1,7 / \%Al_2O_3$ ; \*\*Kr =  $\left[ \frac{(\%SiO_2 \times 1,7)}{\%Al_2O_3} \right] + (\%Fe_2O_3 \times 0,64)$ ;

\*\*\*  $\frac{Al_2O_3^3}{Fe_2O_3} = Al_2O_3 \times 1,57 / Fe_2O_3$  e <sup>2</sup>Difratometria de Raio X; Ct = Caulinita; Gb = Gibbsita; Gt = Goethita; Qz = Quartzo; An = Anatásio.

As amostras de solo foram secas ao ar, peneiradas (< 2 mm) e caracterizadas quanto aos atributos químicos e físicos. Foram determinados pH em H<sub>2</sub>O, KCl e CaCl<sub>2</sub>, P disponível (Mehlich-1), P remanescente (P-rem), K trocável (Mehlich-1), Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> trocáveis (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>), acidez potencial (H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>) e matéria orgânica (MO)

(Silva, 2009). A partir desses resultados, calcularam-se  $\Delta\text{pH}$ , CTC potencial (T), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%) (Tabela 2).

A correção da acidez foi realizada com hidróxido de cálcio p.a. [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] (PM 74,09  $\text{g mol}^{-1}$ ), incorporado ao solo de modo a elevar a saturação de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) na CTC potencial para 55,21%, valor definido com base na saturação natural observada em um Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe) avaliado em experimento paralelo, que serviu como referência de equilíbrio químico entre os solos. O corretivo foi homogeneamente misturado ao solo e mantido em incubação por 30 dias, com umidade controlada (60% do volume de poros preenchidos com água), visando estabilizar o pH e o balanço de cátions antes da aplicação dos tratamentos.

### 3.2.1 Determinação da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)

Após a calagem, foram coletadas subamostras para a estimativa da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP), segundo metodologia descrita por Fonseca *et al.* (1988) e Alvarez *et al.* (2000). Foram utilizados 2,5  $\text{cm}^3$  de terra fina seca ao ar (TFSA) de cada repetição, em pH natural, dispersos em 25 mL de solução de  $\text{CaCl}_2$  0,01  $\text{mol L}^{-1}$  contendo fósforo ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) nas concentrações de 0, 2, 4, 10, 20, 40, 60, 80, 100 e 120  $\text{mg L}^{-1}$  de P. As suspensões foram agitadas horizontalmente por 24 horas em temperatura ambiente, centrifugadas a 4 000 g por 10 minutos, e o fósforo remanescente na solução foi determinado pelo método colorimétrico do ácido ascórbico (Murphy; Riley, 1962).

A quantidade de fósforo adsorvido ( $q$ ,  $\text{mg g}^{-1}$  de solo) foi obtida pela diferença entre o P adicionado e o P remanescente na solução de equilíbrio. Os dados foram ajustados à isoterma de Langmuir (1918), na forma linearizada:

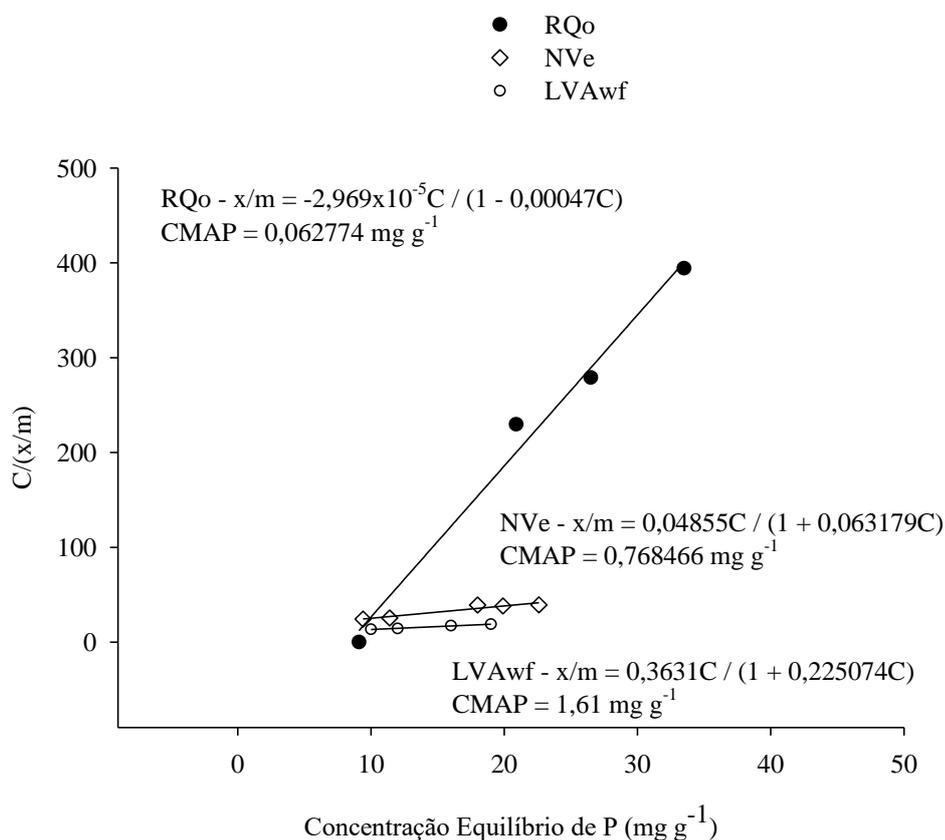
$$\frac{C}{q} = \frac{1}{ab} + \frac{C}{b}$$

Em que C é a concentração de P em equilíbrio ( $\text{mg L}^{-1}$ ), a é a constante relacionada à energia de ligação e b é a capacidade máxima de adsorção (CMAP).

Os parâmetros a e b foram obtidos por regressão linear entre  $C/q$  e C, e os resultados expressos em  $\text{mg g}^{-1}$  de P adsorvido. Os valores de CMAP obtidos nos experimentos paralelos foram de 0,06  $\text{mg g}^{-1}$  para o RQo, 0,77  $\text{mg g}^{-1}$  para o NVe e 1,61  $\text{mg g}^{-1}$  para o LVAwf, refletindo a crescente capacidade de adsorção de P em função do teor de argila e da mineralogia do solo (Figura 1).

As doses de fósforo aplicadas nos experimentos foram estimadas conforme a metodologia proposta por Alvarez V. & Fonseca (1990), que estabelece critérios para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e definição de doses em ensaios de casa de vegetação. Para o Latossolo Vermelho-Amarelo acriférrico (LVAwf), a dose de P utilizada foi de  $400 \text{ mg dm}^{-3}$ , correspondente com a alta capacidade tampão e adsorção desse solo.

As quantidades de fertilizante foram ajustadas com base nos teores de P das fontes, de modo a garantir equivalência no aporte de P e permitir a comparação entre as fontes e os aditivos avaliados. O monoamônio fosfato (MAP) contém 51% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (22,3% de P) e 11% de  $\text{N-NH}_4^+$ , enquanto o superfosfato triplo (ST) apresenta 46% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (20,1% de P) e 10% de Ca. Assim, para atingir a dose de  $400 \text{ mg dm}^{-3}$  de P, foram aplicados aproximadamente  $1,79 \text{ g kg}^{-1}$  de MAP e  $1,99 \text{ g kg}^{-1}$  de ST.



**Figura 1.** Representação gráfica da forma linear da isoterma de Langmuir, das equações hiperbólicas e dos valores estimados da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP,  $\text{mg P g}^{-1}$  de solo) para o Neossolo Quartzarênico Órtico típico (RQo), Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe) e Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf).

### 3.2.2 Delineamento experimental e manejo

O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso, em esquema fatorial  $2 \times 3 + 1$ , composto por duas fontes de fósforo (MAP e ST), três condições de aditivos (sem aditivo, KimcoatBioHP<sup>®</sup> e IFCoat) e um tratamento controle (sem aplicação de P e aditivos), com quatro repetições.

O KimcoatBioHP<sup>®</sup> é um revestimento polimérico composto por 50% CaCO<sub>3</sub>, 16% Ca, além de polímeros e substâncias húmicas, enquanto o IFCoat, é um aditivo teste, consiste em polímero de liberação controlada desenvolvido para retardar a solubilização do fertilizante e reduzir as perdas por fixação.

As unidades experimentais foram compostas por vasos de polietileno de 3 dm<sup>3</sup>, contendo 1,5 kg de solo seco ao ar. A temperatura foi mantida perto de 30°C, e a umidade do solo foi controlada por pesagem dos vasos para reposição da água evapotranspirada.

Durante os primeiros 180 dias, a pesagem e reposição de água foram realizadas diariamente, mantendo o teor de umidade próximo a 60% do volume de poros preenchidos com água. Nos 180 dias seguintes, o controle foi feito a cada 30 dias, simulando ciclos de umedecimento e secagem equivalentes a um ciclo agrícola anual.

### 3.2.3 Amostragem e fracionamento do fósforo

As amostras de solo foram obtidas após a homogeneização do solo de cada unidade experimental, aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após a instalação do experimento (DAI). Posteriormente, foram secas ao ar, peneiradas (< 2 mm) e acondicionadas em sacos devidamente identificados. Para o fracionamento do fósforo, utilizaram 10 g de solo, na proporção de 1:3 (solo:solução extratora).

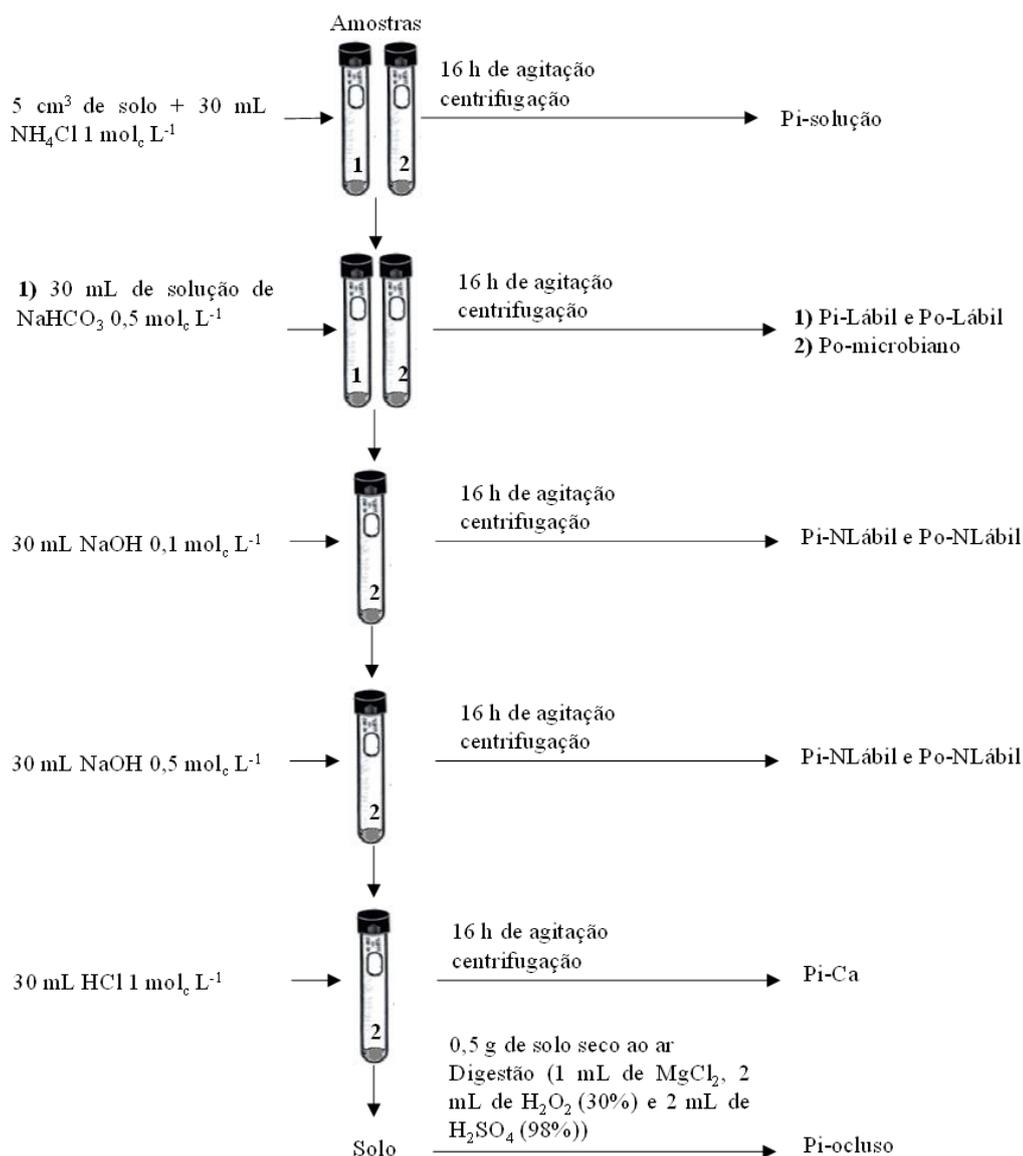
O fósforo em solução (Pi-solução) foi determinado por extração com cloreto de amônio (NH<sub>4</sub>Cl) 1 mol L<sup>-1</sup> (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013), e as demais frações foram obtidas segundo o método sequencial de Hedley (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982) (Figura 2). Após cada extração, adicionaram 25 mL de NaCl 1 mol L<sup>-1</sup>, seguidos de agitação a 200 rpm por 5 minutos e centrifugação a 4 000 g por 5 minutos, descartando o sobrenadante para reduzir interferência de Ca e evitar superestimação das frações orgânicas lábil (Po-Lábil) e a pouco a moderadamente lábil (Po-NLábil).

A superestimação das frações Po-Lábil e Po-NLábil ocorre pela precipitação de Ca com o ânion fosfato em meio acidificado pela adição do ácido sulfúrico utilizado para precipitar os compostos orgânicos, obtidos na extração com bicarbonato de sódio

( $\text{NaHCO}_3$ ) e hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) a 0,5 e 1 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013).

As frações inorgânicas do P no solo foram classificadas em: P extraído pelo  $\text{NH}_4\text{Cl}$  1 mol L<sup>-1</sup> como P em solução (Pi-solução); P extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup> em P inorgânico lábil (Pi-Lábil); P extraído pelo  $\text{NaOH}$  0,1 mol L<sup>-1</sup> equivalente ao P inorgânico precipitado com Fe e Al na solução do solo (Pi Fe+Al) (Costa *et al.*, 2016; Cross; Schlesinger, 1995; Klotzbücher *et al.*, 2019; Luo; Yuan; Huang, 2024; Mirabello *et al.*, 2013; Redel *et al.*, 2016); P extraído pelo  $\text{NaOH}$  0,5 mol L<sup>-1</sup> equivalente ao P inorgânico não lábil (Pi-NLábil); P extraído pelo  $\text{HCl}$  1 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> em P inorgânico precipitado com Ca de diferentes espécies iônicas (Pi-Ca) e o P extraído por digestão sulfúrica,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 65% (1:1 v/v solo : solução extratora) em P inorgânico ocluso e pequenas frações de P precipitado com Ca não extraídos pelo  $\text{HCl}$  (Pi-occluso).

As frações orgânicas foram classificadas em: P orgânico microbiano, que equivale ao P na biomassa microbiana viva, extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup> + clorofórmio ( $\text{CHCl}_3$ ) em P orgânico microbiano (Po-mic); P extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup> em P orgânico lábil (Po-Lábil); P orgânico extraído pelo  $\text{NaOH}$  a 0,1 mol L<sup>-1</sup> em P orgânico moderadamente lábil (Po-MLábil) e P orgânico extraído pelo  $\text{NaOH}$  a 0,5 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> em P orgânico não lábil (Po-NLábil).



**Figura 2.** Esquema do fracionamento do fósforo no solo de acordo com o método (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982) com modificações e correlação das frações com as formas do fósforo no solo (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013). Fonte: Adaptado de (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013).

### 3.2.4 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste de média (Scott Knott 5% de prob.). Quando ajustados modelos matemáticos para as respostas dos tratamentos, foi realizado a análise de identidade dos modelos para cada variável. As análises estatísticas foram realizadas no R (R Core Team, 2021) utilizando os pacotes ExpDes.pt (Ferreira; Cavalcanti; Nogueira, 2021) e FactoMineR (Lê; Josse; Husson, 2008). Além disso, foi realizada uma análise de correlação de *Pearson* ( $r$ ) entre as frações de P ( $p < 0,01$  e  $0,05$ ).

**Tabela 2.** Caracterização química das subamostras dos solos Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf).

<b>Características</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
<b>pH H<sub>2</sub>O</b>	-	5,23
<b>pH CaCl<sub>2</sub></b>	-	4,61
<b>pH KCl</b>	-	4,54
<b>ΔpH</b>	-	-0,7
<b>P – M1</b>	mg dm <sup>-3</sup>	6,57
<b>P-rem</b>	mg dm <sup>-3</sup>	28,73
<b>Pi<sup>1</sup>-solução</b>	mg dm <sup>-3</sup>	2,33
<b>Pi-Lábil</b>	mg dm <sup>-3</sup>	95,85
<b>Po<sup>2</sup>-Lábil</b>	mg dm <sup>-3</sup>	68,48
<b>Po-microbiano</b>	mg dm <sup>-3</sup>	8,83
<b>Pi-Não Lábil</b>	mg dm <sup>-3</sup>	29,87
<b>Po-Não Lábil</b>	mg dm <sup>-3</sup>	207,3
<b>Pi-Fe+Al</b>	mg dm <sup>-3</sup>	194,08
<b>Po-Recalcitrante</b>	mg dm <sup>-3</sup>	266,48
<b>Pi-Ca</b>	mg dm <sup>-3</sup>	0,6
<b>K</b>	mg dm <sup>-3</sup>	40
<b>Ca</b>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	2,52
<b>Mg</b>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	1,93
<b>Al</b>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,13
<b>H+Al</b>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	2,52
<b>Soma de Bases (SB)</b>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	4,55
<b>CTC pH 7,0 (T)</b>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	7,07
<b>Saturação de Bases (V)</b>	%	64,4
<b>Saturação de alumínio (m)</b>	%	2,8
<b>Matéria Orgânica do Solo (M.O.)</b>	g dm <sup>-3</sup>	48,7

<sup>1</sup>Pi – Fósforo na fração inorgânica; <sup>2</sup>Po – fósforo na fração orgânica do solo.

### 3.3 Resultado e Discussão

A aplicação de fertilizantes fosfatados inicia imediatamente processos de dissolução e liberação de ânions fosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) na solução do solo (Novais; Smyth, 1999; Novais; Smyth; Nunes, 2007). Neste processo, observam-se diferenças marcantes entre as fontes, mesmo apresentando alta dissolução. Enquanto o monoamônio fosfato (MAP) apresenta dissolução completa, liberando simultaneamente íons fosfato e amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), o superfosfato triplo (ST) mostra dissolução parcial, liberando íons fosfato e formação de fosfato bicálcico (CaHPO<sub>4</sub>) (Lindsay; Lehr; Stephenson, 1959; Lindsay; Stephenson, 1959; Lindsay, 1979; Reetz Jr, 2016).

Aos 30 dias após incubação (DAI) em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf), ambas as fontes mostraram padrões similares de disponibilidade de fósforo inorgânico em solução (Pi-solução) quando aplicadas sem aditivos (Figura 3A). Entretanto, a adição de aditivos nos fertilizantes modificou significativamente este

padrão. O tratamento MAP com o aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup> resultou em aumento nos teores de Pi-solução comparado ao MAP com o aditivo IFCoat (Figura 3A). Embora o incremento proporcionado pelo KimcoatBioHP<sup>®</sup> não tenha sido estatisticamente diferente do MAP não tratado, foi suficiente para diferenciar do tratamento controle sem adubação fosfatada (Figura 3A). Destaca-se que o KimcoatBioHP<sup>®</sup> apresentou maior eficácia quando combinado ao MAP, com valores de Pi-solução superiores aos obtidos com ST (Figura 3A). Notavelmente, os aditivos não exerceram efeito significativo sobre a disponibilidade de P quando aplicados com ST (Figura 3A), possivelmente por causa da estabilidade dos complexos de fosfato bicálcico formados. Estes resultados demonstram que a eficácia dos aditivos está intimamente relacionada à matriz química do fertilizante, sendo mais pronunciada em fontes de dissolução completa como o MAP.

Logo após a liberação de fósforo na solução do solo, caso não seja absorvido diretamente pelas plantas, é rapidamente adsorvido, tornando parte da fração lábil em um processo que pode ocorrer em horas ou dias (Novais; Smyth, 1999). Inicialmente, a adsorção ocorre de forma rápida por interações eletrostáticas entre os grupos OH<sup>-</sup> e OH<sub>2</sub><sup>+</sup> presentes na superfície dos coloides, formando um complexo de esfera externa, conhecido como troca de ligantes (Hingston; Posner; Quirk, 1972; Parfitt, 1978).

Essa fração é prontamente disponível para a absorção vegetal e representa parte do fator quantidade (Q), com potencial para retornar à solução do solo, que representa o fator intensidade (I) de P (Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008).

**Tabela 3.** Análise de variância das frações de P no Latossolo Vermelho Amarelo acriférico (LVAwf) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI).

Fontes de Variação	Fertilizantes (F)	Aditivo (A)	F vs. A	Adicional vs. Fatorial	CV(%)	Média ± erro
<b>30 DAI</b>						
Pi-solução	3,26 <sup>ns</sup>	1,03 <sup>ns</sup>	4,71 <sup>*</sup>	4,86 <sup>*</sup>	48,44	1,28 ± 0,14
Pi-Lábil	9,16 <sup>**</sup>	0,89 <sup>ns</sup>	4,05 <sup>*</sup>	1,27 <sup>ns</sup>	52,23	1,03 ± 0,12
Pi-NLábil	1,43 <sup>ns</sup>	1,07 <sup>ns</sup>	2,30 <sup>ns</sup>	1,73 <sup>ns</sup>	50,48	120,20 ± 12,27
Pi-ocluso	12,47 <sup>**</sup>	1,53 <sup>ns</sup>	0,75 <sup>ns</sup>	0,07 <sup>ns</sup>	13,73	119,36 ± 3,68
Pi-Fe+Al	0,13 <sup>ns</sup>	7,99 <sup>**</sup>	6,43 <sup>**</sup>	4,81 <sup>*</sup>	32,00	47,37 ± 4,08
Pi-Ca	0,99 <sup>ns</sup>	0,71 <sup>ns</sup>	4,37 <sup>*</sup>	1,61 <sup>ns</sup>	72,03	2,90 ± 0,44
Po-Lábil	0,69 <sup>ns</sup>	0,71 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>	7,17 <sup>*</sup>	69,89	5,04 ± 0,72
Po-mic	0,37 <sup>ns</sup>	1,34 <sup>ns</sup>	0,36 <sup>ns</sup>	4,66 <sup>*</sup>	85,77	2,67 ± 0,45
Po-MLábil	0,00 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	—	—
Po-NLábil	1,05 <sup>ns</sup>	12,07 <sup>**</sup>	4,06 <sup>*</sup>	1,45 <sup>ns</sup>	92,18	13,20 ± 3,31
<b>90 DAI</b>						
Pi-sol	0,05 <sup>ns</sup>	0,69 <sup>ns</sup>	9,01 <sup>**</sup>	22,86 <sup>**</sup>	9,07	0,41 ± 0,01
Pi-Lábil	0,78 <sup>ns</sup>	2,54 <sup>ns</sup>	1,66 <sup>ns</sup>	12,79 <sup>**</sup>	53,26	6,24 ± 0,79
Pi-NLábil	3,91 <sup>ns</sup>	3,41 <sup>ns</sup>	6,10 <sup>**</sup>	12,88 <sup>**</sup>	32,13	233,67 ± 20,60
Pi-ocluso	11,02 <sup>**</sup>	2,07 <sup>ns</sup>	7,67 <sup>**</sup>	37,92 <sup>**</sup>	7,80	197,94 ± 5,31
Pi-Fe+Al	0,47 <sup>ns</sup>	1,00 <sup>ns</sup>	0,33 <sup>ns</sup>	12,37 <sup>**</sup>	38,46	48,21 ± 4,07
Pi-Ca	31,59 <sup>**</sup>	6,92 <sup>**</sup>	3,99 <sup>*</sup>	16,62 <sup>**</sup>	45,46	11,00 ± 1,73
Po-Lábil	0,79 <sup>ns</sup>	6,42 <sup>**</sup>	1,72 <sup>ns</sup>	7,84 <sup>*</sup>	48,82	8,74 ± 1,05
Po-mic	44,56 <sup>**</sup>	43,14 <sup>**</sup>	42,82 <sup>**</sup>	9,98 <sup>**</sup>	65,74	7,98 ± 3,00
Po-MLábil	4,39 <sup>*</sup>	4,35 <sup>*</sup>	2,23 <sup>ns</sup>	10,12 <sup>**</sup>	65,11	38,29 ± 6,33
Po-NLábil	1,70 <sup>ns</sup>	0,69 <sup>ns</sup>	0,69 <sup>ns</sup>	0,39 <sup>ns</sup>	318,31	0,84 ± 0,50
<b>180 DAI</b>						
Pi-sol	8,28 <sup>**</sup>	7,29 <sup>**</sup>	5,60 <sup>*</sup>	30,17 <sup>**</sup>	14,86	0,57 ± 0,03
Pi-Lábil	0,25 <sup>ns</sup>	8,69 <sup>**</sup>	5,63 <sup>*</sup>	9,15 <sup>**</sup>	40,99	4,17 ± 0,48
Pi-NLábil	7,44 <sup>*</sup>	2,08 <sup>ns</sup>	0,46 <sup>ns</sup>	2,52 <sup>ns</sup>	29,11	129 ± 8,25
Pi-ocluso	0,90 <sup>ns</sup>	3,21 <sup>ns</sup>	0,95 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	11,85	256,65 ± 6,10
Pi-Fe+Al	0,75 <sup>ns</sup>	1,27 <sup>ns</sup>	1,96 <sup>ns</sup>	20,93 <sup>**</sup>	19,77	104,37 ± 5,26
Pi-Ca	0,09 <sup>ns</sup>	1,68 <sup>ns</sup>	2,33 <sup>ns</sup>	1,72 <sup>ns</sup>	152,99	0,60 ± 0,18

Fontes de Variação	Fertilizantes (F)	Aditivo (A)	F vs. A	Adicional vs. Fatorial	CV(%)	Média ± erro
<b>Continuação 180 DAI</b>						
<b>Po-Lábil</b>	56,23**	14,90**	23,98**	44,64**	21,59	13,59 ± 1,51
<b>Po-mic</b>	–	–	–	–	–	–
<b>Po-MLábil</b>	1,37 <sup>ns</sup>	7,10**	14,51**	15,34**	48,06	58,41 ± 9,18
<b>Po-NLábil</b>	3,85 <sup>ns</sup>	4,58*	7,34**	2,14 <sup>ns</sup>	38,05	5,95 ± 0,59
<b>270 DAI</b>						
<b>Pi-sol</b>	2,42 <sup>ns</sup>	1,50 <sup>ns</sup>	1,16 <sup>ns</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	22,03	1,98 ± 0,08
<b>Pi-Lábil</b>	0,49 <sup>ns</sup>	1,34 <sup>ns</sup>	1,01 <sup>ns</sup>	8,55**	44,09	3,95 ± 0,37
<b>Pi-NLábil</b>	0,95 <sup>ns</sup>	0,74 <sup>ns</sup>	0,34 <sup>ns</sup>	0,32 <sup>ns</sup>	19,79	223,04 ± 7,93
<b>Pi-ocluso</b>	0,29 <sup>ns</sup>	0,12 <sup>ns</sup>	0,42 <sup>ns</sup>	30,95**	9,07	402,57 ± 9,70
<b>Pi-Fe+Al</b>	0,17 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	32,20**	21,59	96,79 ± 5,57
<b>Pi-Ca</b>	0,52 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	5,34*	6,41*	55,43	2,05 ± 0,26
<b>Po-Lábil</b>	0,17 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>	3,79*	0,59 <sup>ns</sup>	63,50	3,50 ± 0,44
<b>Po-mic</b>	0,044 <sup>ns</sup>	0,83 <sup>ns</sup>	3,29 <sup>ns</sup>	1,77 <sup>ns</sup>	139,06	1,04 ± 0,29
<b>Po-MLábil</b>	9,57**	1,08 <sup>ns</sup>	2,85 <sup>ns</sup>	25,41**	39,91	79,04 ± 9,17
<b>Po-NLábil</b>	66,57**	23,65**	23,65**	9,51**	70,05	11,90 ± 4,20
<b>360 DAI</b>						
<b>Pi-sol</b>	24,12**	1,82 <sup>ns</sup>	4,20*	14,44**	27,92	1,05 ± 0,09
<b>Pi-Lábil</b>	14,51**	0,38 <sup>ns</sup>	3,45*	40,81**	33,10	25,59 ± 2,82
<b>Pi-NLábil</b>	0,14 <sup>ns</sup>	0,28 <sup>ns</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	5,76*	34,44	314 ± 22,26
<b>Pi-ocluso</b>	0,99 <sup>ns</sup>	0,36 <sup>ns</sup>	2,55 <sup>ns</sup>	3,49 <sup>ns</sup>	15,70	148,79 ± 4,75
<b>Pi-Fe+Al</b>	1,80 <sup>ns</sup>	2,70 <sup>ns</sup>	0,97 <sup>ns</sup>	28,92**	24,17	104,11 ± 7,03
<b>Pi-Ca</b>	1,75 <sup>ns</sup>	0,68 <sup>ns</sup>	2,56 <sup>ns</sup>	3,06 <sup>ns</sup>	84,38	1,46 ± 0,25
<b>Po-Lábil</b>	0,00 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	9,78**	414,36	0,22 ± 0,19
<b>Po-mic</b>	0,04 <sup>ns</sup>	1,50 <sup>ns</sup>	1,92 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	208,52	0,45 ± 0,18
<b>Po-MLábil</b>	0,57 <sup>ns</sup>	1,36 <sup>ns</sup>	0,93 <sup>ns</sup>	0,26 <sup>ns</sup>	419,88	2,42 ± 1,90
<b>Po-NLábil</b>	0,00 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	–	±

<sup>ns</sup>, \*\*, \* = não significativo, significativo a 1% e 5%; Pi-solução = P inorgânico em solução (P<sub>NH4Cl-1,0</sub>); Pi-Lábil = P inorgânico lábil (P<sub>BIC</sub>); Pi-NLábil P inorgânico não lábil (P<sub>HID-0,5</sub>); Pi.ocluso = P inorgânico ocluso ou P residual (P<sub>H2SO4+H2O2</sub>); Pi-Fe+Al P inorgânico precipitado com Fe e Al (P<sub>HID1,0</sub>); P inorgânico precipitado com cálcio (P<sub>HCl1,0</sub>); Po-Lábil = P orgânico lábil (P<sub>BIC</sub>); Po-mic = P na biomassa microbiana viva (P<sub>BIC+CHCl3</sub>); Po.MLábil = P orgânico moderadamente lábil (P<sub>HID-0,1</sub>); Po-NLábil = P orgânico não lábil (P<sub>HID-0,5</sub>); Fertilizantes (F) = MAP (fosfato monoamônio – NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) e ST (superfosfato triplo (Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); Aditivos (A) = KimcoatBioHP®, IFCoat e sem aditivos; F vs. A = interação; Adicional vs. Fatorial = interação; CV (%) = coeficiente de variação; Média ± erro = média e erro do tratamento fatorial.

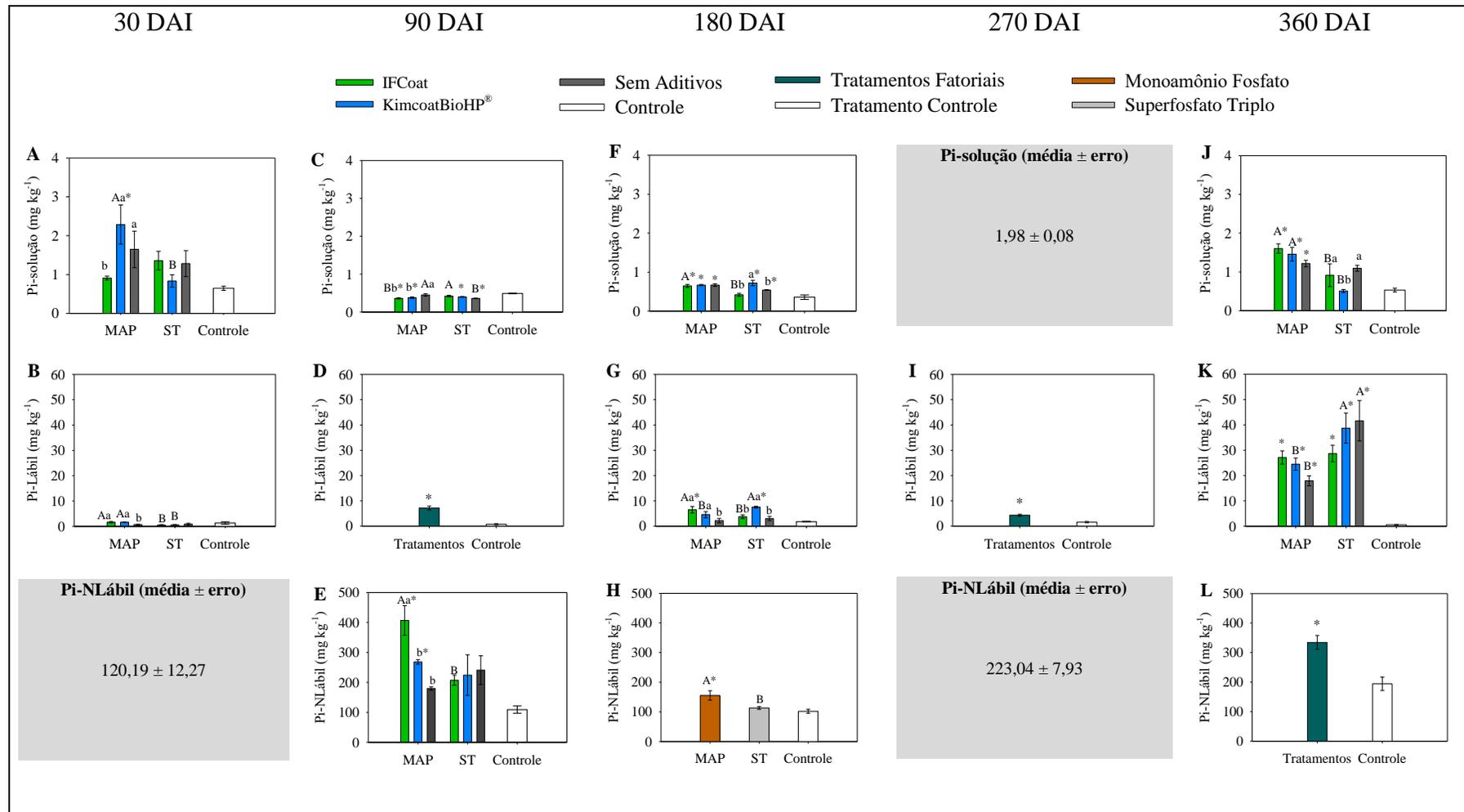
Essa fração é prontamente disponível para a absorção vegetal e representa parte do fator quantidade (Q), com potencial para retornar à solução do solo, que representa o fator intensidade (I) de P (Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008).

Aos 30 DAI, observou-se que a aplicação do MAP com os aditivos KimcoatBioHP® e IFCoat aumentou os teores de Pi-lábil em comparação ao MAP sem aditivos (Figura 3B). No entanto, essas alterações não foram suficientes para diferenciar significativamente os tratamentos de aditivos com MAP do tratamento controle, sem adubação fosfatada (Figura 3B). Além disso, os aditivos aplicados com o MAP apresentaram maiores valores de Pi-Lábil do que quando aplicados com o ST (Figura 3B). Com o ST não houve alteração do Pi-Lábil quando tratado com os aditivos (Figura 3B). O aumento do P inorgânico lábil quando aplicado o MAP com os aditivos KimcoatBioHP® e IFCoat pode ser explicado pela redução das perdas por precipitação com Fe e Al (Figura 4B). Dessa forma, os aditivos contribuíram para manter o ânion fosfato em solução por mais tempo, favorecendo a interação com a superfície dos coloides, mantendo maior proporção na fração trocável do solo.

Com o passar do tempo, a interação entre a molécula de fosfato e os óxidos e hidróxidos de Fe e Al pode evoluir formando um complexo de esfera interna, inicialmente mononucleada (Pi-NLábil), em que os íons fosfatos em solução deslocam os grupamentos  $\text{OH}^-$  e  $\text{OH}^{2+}$  da superfície dos coloides, liberando  $\text{H}_2\text{O}$  e estabelecendo ligação predominantemente covalente e de alta energia entre o fosfato e os coloides (Fixen; Grove, 1990; Hingston; Posner; Quirk, 1972). Esse fenômeno, denominado quimiossorção ou adsorção específica do fosfato, pode levar anos para atingir o equilíbrio (Barrow, 1986), porém é de difícil reversão.

Apesar desse mecanismo ser bem estabelecido, os resultados aos 30 DAI indicaram que o teor Pi-NLábil não foi alterado (Tabela 3). Provavelmente, o tempo de contato entre o fertilizante e o solo foi insuficiente para que reações de desidratação e formação de complexos de esfera interna ocorressem em escala significativa.

Logo em seguida, a adsorção específica do fosfato aos coloides pode evoluir para complexo de esfera interna binucleada (Pi-ocluso), aprisionado na estrutura cristalina de óxidos de Fe e Al, como aluminofosfatos ( $\text{AlPO}_4$ ) e silicofosfatos (Fixen; Grove, 1990; Novais; Smyth, 1999; Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008; Souza Júnior *et al.*, 2012; Weil; Brady, 2017).



**Figura 3.** Frações de fósforo em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférico (LVAwf) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). Fósforo inorgânico em solução (Pi-solução), fósforo inorgânico lábil (Pi-Lábil) e fósforo inorgânico não lábil (Pi-NLábil), em mg kg<sup>-1</sup>.

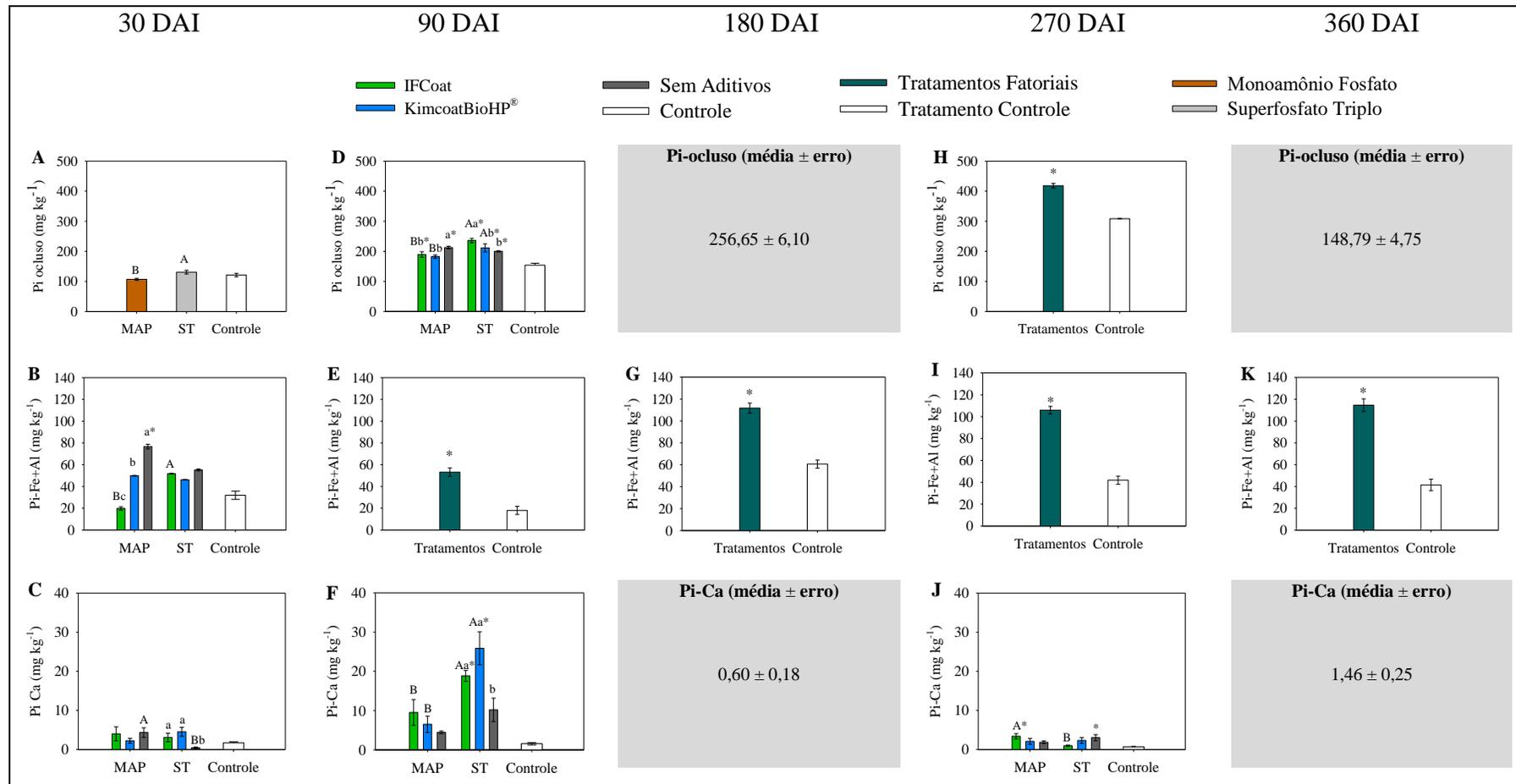
Aos 30 DAI, não houve efeito dos aditivos sobre os teores de Pi-ocluído (Tabela 3). No entanto, a aplicação do ST resultou nos maiores valores em comparação ao MAP (Figura 4A). O ST fornece P principalmente na forma de fosfato monocálcico, solúvel em água (Malavolta *et al.*, 1981; Raij *et al.*, 1996; Silva *et al.*, 2005), que pode reagir com óxidos e hidróxidos de Fe e Al em solos ácidos, favorecendo a oclusão de fósforo ao longo do tempo. Adicionalmente, parte do fósforo fornecido pelo ST pode sofrer transformações secundárias no solo, especialmente em ambientes com disponibilidade de  $\text{Ca}^{2+}$ , proveniente da calagem ou da dissolução de minerais. Nessa condição, o fosfato monocálcico pode reagir com o cálcio, formando fosfato bicálcico (Lindsay; Lehr; Stephenson, 1959; Lindsay; Stephenson, 1959; Lindsay, 1979), uma forma menos solúvel em água e solúvel em citrato de amônio (Malavolta *et al.*, 1981; Reetz Jr, 2016).

Embora a digestão com  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$  utilizada no fracionamento de P do solo, seja projetada para solubilizar preferencialmente o P ocluído em óxidos de Fe e Al (Viana, 2016), esse método também pode extrair parte do fosfato bicálcico, especialmente após a calagem. Isso pode resultar em superestimação do Pi-ocluído, já que o aumento da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  pode favorecer a precipitação de fosfato bicálcico, confundindo a extração com a de formas realmente ocluídas.

Além de ser adsorvido aos colóides minerais, o P que não é absorvido pelas plantas ou imobilizado por microrganismos pode precipitar com Fe, Al ou Ca, dependendo do pH do solo (Novais; Smyth; Nunes, 2007; Parfitt, 1978; Sample; Soper; Racz, 1980). Em solos altamente intemperizados, como o LVAwf, devido à alta acidez e baixa saturação por bases, a precipitação do P com Ca é menor que a com Fe e Al.

No presente estudo, o LVAwf apresentou pH ácido (pH  $\text{H}_2\text{O}$  = 5,23 e pH  $\text{CaCl}_2$  = 4,60), condição que favorece a reação de P com  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Al}^{3+}$ , formando compostos de baixa solubilidade, como strengita e variscita (Raij, 1991). No entanto, com a aplicação de hidróxido de cálcio, que é altamente reativo e capaz de elevar rapidamente o pH do solo, tende a redução da disponibilidade de  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  livres em solução (Novais; Smyth; Nunes, 2007).

Os resultados aos 30 DAI apontam que a aplicação do MAP com o aditivo IFCoat reduziu substancialmente a precipitação de fósforo com Fe e Al, mais eficientemente do que a aplicação de MAP com o aditivo KimcoatBioHP® (Figura 4B). Além disso, a aplicação de MAP com IFCoat apresentou valores menores de Pi-Fe+Al em comparação a combinação de ST com o mesmo aditivo (Figura 4B). Não foram observadas diferenças significativas entre os aditivos quando aplicados com ST (Figura 4B).



**Figura 4.** Frações de fósforo em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférico (LVAwf) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). Fósforo inorgânico ocluído (Pi-occluso), fósforo inorgânico precipitado com Fe<sup>3+</sup> e Al<sup>3+</sup> livres em solução (Pi-Fe+Al) e fósforo inorgânico precipitado com Ca<sup>2+</sup> (Pi-Ca), em mg kg<sup>-1</sup>.

Esses resultados indicam que a calagem não foi o principal fator responsável pela redução da precipitação de P com Fe e Al na fonte MAP, mas sim a ação dos aditivos, em especial o IFCoat, possivelmente por reduzir o Pi em solução (Figura 3A). Sendo justificado pelas reações de precipitação que ocorrem quando a concentração de P em solução excede o produto de solubilidade do mineral específico (Havlin, 2017).

Conforme já discutido, o fósforo pode precipitar com o Fe, Al e Ca livres em solução (Do Nascimento *et al.*, 2018; Raij, 1991). Aos 30 DAI, houve efeito dos aditivos sobre o P inorgânico precipitado com Ca (Pi-Ca) apenas nos tratamentos com o fertilizante ST, sendo que as maiores perdas ocorreram quando o ST foi tratado com os aditivos KimcoatBioHP<sup>®</sup> ou IFCoat (Figura 4C).

No caso do MAP, por não conter Ca na formulação, é provável que o P aplicado tenha reagido com o Ca<sup>2+</sup> proveniente da calagem, favorecendo a formação de Pi-Ca (Figura 4C). Por outro lado, no ST, cuja principal forma de P é o fosfato monocálcico, a ausência de aditivos pode ter permitido, com o tempo, a formação de compostos menos solúveis, como fosfato bicálcico ou hidroxiapatita. Esses compostos são extraídos pela digestão sulfúrica no fracionamento de Hedley (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982) e quantificados na fração de fósforo inorgânico ocluso (Figura 4A) (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013).

Esses resultados sugerem que os aditivos desempenham papel fundamental nas interações entre o fósforo e os cátions do solo, influenciando a distribuição do P entre as diferentes frações e podendo reduzir a formação de frações menos solúveis. Considerando que, pela acidificação futura do solo, pode ocorrer a reversibilidade da reação de Pi-Ca (Havlin, 2017; Novais; Smyth; Nunes, 2007).

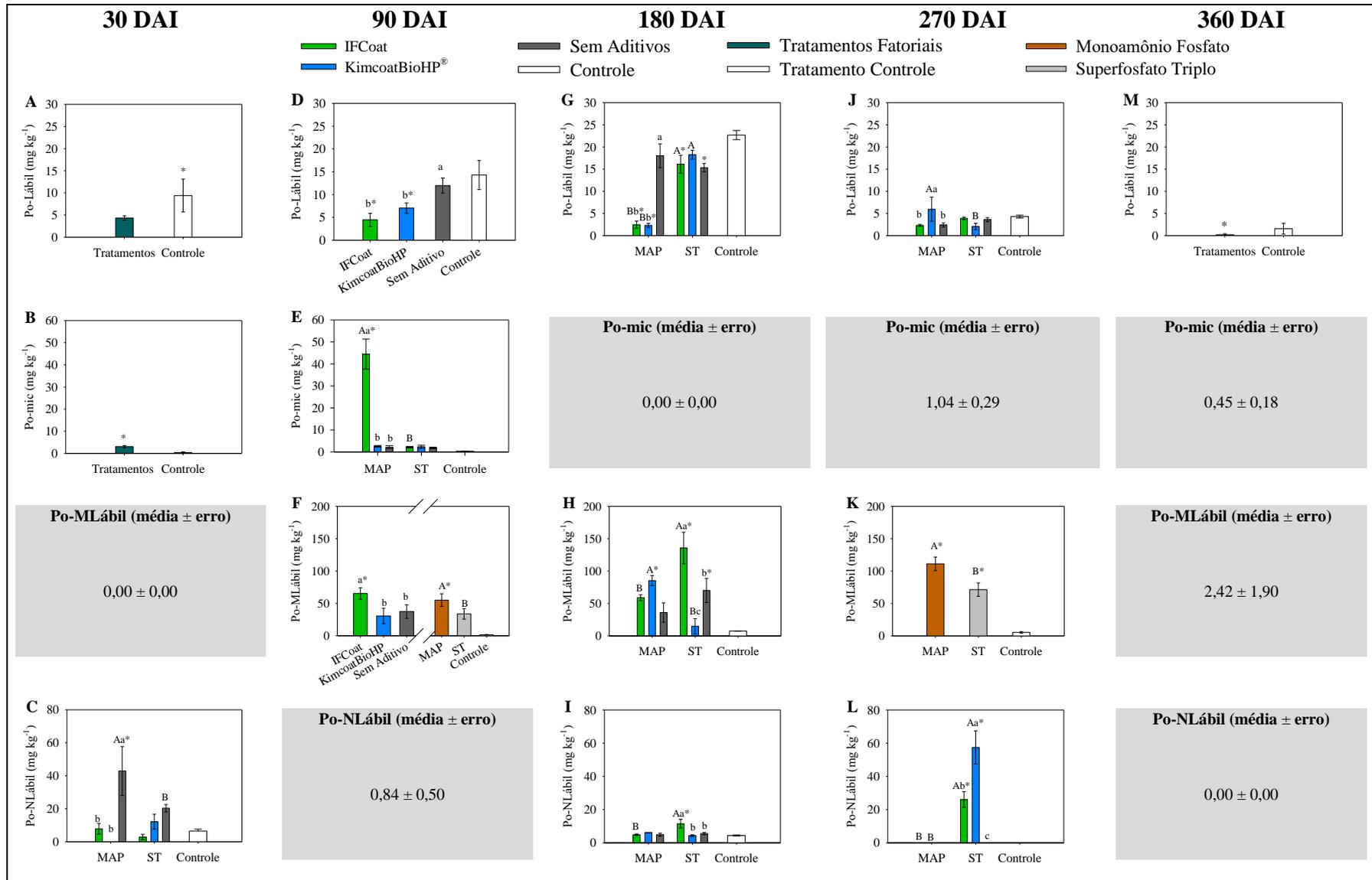
Após a liberação do P na solução, além do direcionamento para outras frações inorgânicas, pode ocorrer a imobilização do fósforo por microrganismos nas frações orgânicas (Novais; Smyth; Nunes, 2007; Pavinato, 2007). A dinâmica do fósforo orgânico é regulada, principalmente, pela relação C/P, por meio dos processos antagônicos de mineralização e imobilização. Esses processos são influenciados pela quantidade de fósforo presente na matéria orgânica, sendo que o ponto de equilíbrio ocorre quando os resíduos vegetais contêm 0,2% de P. Acima desse valor, ocorre a mineralização com liberação de P em solução, enquanto abaixo, prevalece a imobilização na biomassa microbiana, até que a relação C/P seja reduzida pela decomposição (Novais; Smyth, 1999).

No LVAwf utilizado neste estudo, aos 30 dias após a incubação, para a fração Po-Lábil aos 30 DAI, verificou-se que o tratamento controle apresentou o maior valor em relação aos tratamentos com fertilizantes e aditivos (Tabela 3; Figura 5A). A aplicação dos fertilizantes ST e MAP, que também fornecem Ca e/ou N, parece ter intensificado a transformação da matéria orgânica pela microbiota, resultando na redução de Po-Lábil (Figura 5A) e no aumento do Po-mic (Figura 5B), por causa da maior imobilização do P microbiano (Novais; Smyth; Nunes, 2007; Pavinato, 2007). Paralelamente, observou-se aumento da imobilização microbiana de P (Po-mic), independentemente da fonte fosfatada ou aditivo utilizado, em comparação ao controle sem adubação fosfatada (Tabela 3; Figura 5B).

Aos 30 DAI, o Po-MLábil apresentou valor igual a zero, indicando pouca contribuição dessa fração ou possível degradação dela pela microbiota. No entanto, a fração mais recalcitrante, o Po-NLábil, sofreu alteração pelos tratamentos aplicados (Figura 5C). A principal alteração observada foi o alto valor de Po-NLábil com a aplicação do MAP sem aditivos (Figura 5C). Isso sugere que o uso dos aditivos KimcoatBioHP® e IFCoat, quando associados ao MAP, reduziram as perdas de P por imobilização na fração orgânica não lábil aos 30 dias (Figura 5C). E contraste, quando utilizado o ST, a aplicação dos diferentes aditivos não promoveu alterações significativas na fração Po-Nlábil (Figura 4C). Entretanto, ao comparar as fontes sem aditivos, o ST apresentou menor perda para a fração orgânica não lábil do que MAP (Figura 4C), reforçando a ação benéfica da aplicação de aditivos junto ao MAP.

Aos 90 DAI no LVAwf, houve a redução de Pi-solução, principalmente para a combinação do MAP com os aditivos KimcoatBioHP® e IFCoat (Figura 3C). Esse comportamento contrasta com os resultados obtidos aos 30 DAI (Figura 3A) e indica que, com o tempo, o contato do ânion fosfato com a superfície dos colóides do solo favoreceu o processo de adsorção por complexo de esfera externa, um processo reversível, que mantém o P adsorvido nos colóides, mas em equilíbrio com o Pi em solução (Barrow, 1983; Hingston; Posner; Quirk, 1972; Parfitt, 1978; Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008).

Esse fenômeno, refletiu no aumento dos valores médios de Pi-Lábil, entre os 30 DAI aos 90 DAI (Tabela 3). Além disso, o maior tempo de incubação favoreceu a evolução da adsorção não específica para a adsorção específica por complexos de esfera interna, por meio de processos de desidratação e reorganização molecular (Hingston; Posner; Quirk, 1972). Como resultado, também houve o aumentando da fração Pi-Nlábil, entre os 30 e 90 dias de incubação (Tabela 3).



**Figura 5.** Frações de fósforo em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após a incubação (DAI). Fósforo orgânico lábil (Po-lábil), fósforo microbiano (Po-mic) e fósforo orgânico moderadamente lábil (Po-MLábil), em mg kg<sup>-1</sup>.

Aos 90 dias DAI, a aplicação dos tratamentos promoveu aumento significativo nos teores de Pi-lábil, independentemente da fonte ou do aditivo utilizado, resultando em médias superiores à observada no solo sem adubação fosfatada (Figura 3D). A comparação com o controle mostra que a prática agrícola do uso de fertilizantes fosfatados influencia no aumento do P em solução, diretamente disponível às plantas, ainda que essa forma de fósforo possa ser convertida em formas não disponíveis, de forma rápida, principalmente em solos tropicais altamente intemperizados (Novais; Smyth, 1999), que é o caso do LVAwf do estudo.

Esse comportamento foi verificado no experimento, pois a fração de Pi-NLábil não lábil alterou com a aplicação fertilizantes e aditivos aos 90 DAI (Figura 3E), sendo que a combinação de MAP com IFCoat resultou nos maiores valores (Figura 3E). Contudo, isso indica que os aditivos aliados ao MAP, que é altamente solúvel, promoveram alta liberação de P em solução, aos 30 DAI (Figura 3A), e reduziram a precipitação com Fe e Al (Figura 4B). Esse maior tempo de permanência do ânion fosfato em solução (90 DAI), aliado à ausência de plantas para absorção, como exemplo do feijoeiro, que já teria sido colhido aos 90 dias, favoreceu a adsorção do P pelos colóides do solo (Figura 3E), reduzindo a disponibilidade. Destacando o papel essencial do cultivo de plantas para ciclagem de nutrientes.

Com o tempo, as transformações do P-Lábil em formas não lábeis contribuem para a formação de um estoque, “legado”, de P no solo, que continuará a impactar as práticas agrícolas (Carmo; Caballero; Alves, 2023; Pavinato *et al.*, 2020; Shen *et al.*, 2019; Withers *et al.*, 2018). O desafio futuro, portanto, não se limita apenas ao fornecimento de P, mas envolve o manejo inteligente para mobilizar esse legado, tornando-o novamente disponível às plantas por meio de estratégias como o uso de culturas extratoras, consórcios entre espécies com diferentes estratégias de absorção, aplicação de aditivos biológicos, como microrganismos solubilizadores de fósforo, e ajustes no manejo da calagem e da matéria orgânica.

Aos 90 DAI, a fração de Pi-ocluso, apresentou incremento pela aplicação de fertilizantes fosfatados e aditivos, passando de 119,36 para 197,94 mg kg<sup>-1</sup>, entre 30 e 90 dias, respectivamente (Tabela 3). Esse aumento foi mais expressivo nos tratamentos com ST aplicado com os aditivos IFCoat e KimcoatBioHP<sup>®</sup>, quando comparado aos tratamentos com MAP aplicado com os mesmos aditivos (Figura 4D). No caso do ST, o aditivo IFCoat resultou no maior valor de Pi-ocluso, ao contrário do que se observou com

o MAP, em que a ausência de aditivos levou aos maiores valores dessa fração (Figura 4D).

Mesmo considerando que a composição amoniacal do MAP pode elevar o pH local temporariamente e a acidez gerada pela dissolução ST pode favorecer as reações com óxidos de Fe e Al, culminando na oclusão de P (Novais; Smyth, 1999; Sample; Soper; Racz, 1980; Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008; Souza Júnior *et al.*, 2012; Weil; Brady, 2017), deve-se considerar também a possível formação de fosfato bicálcico, formado pela dinâmica de liberação de P pelo ST (Lindsay; Lehr; Stephenson, 1959; Lindsay; Stephenson, 1959; Lindsay, 1979; Malavolta *et al.*, 1981; Reetz Jr, 2016) e, também, pela precipitação com o  $\text{Ca}^{2+}$  oriundo da calagem. Embora pouco solúvel, o fosfato bicálcico é suscetível à digestão ácida ( $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ ), método utilizado na extração do Pi-ocluso (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013), pode ter contribuído para os elevados valores observados dessa fração (Figura 4A e 4D).

Entre os 90 dias de incubação até o final do experimento, o fósforo precipitado com Fe e Al (Pi-Fe+Al), não alterou com o uso de fertilizantes ou aditivos de forma isolada ou com a interação entre ambos, havendo apenas diferença entre a aplicação de fertilizantes e o tratamento controle (Figuras 4E, 4G, 4I e 4K). Entre 90 e 180 dias, após a incubação, houve incremento dos valores médios de Pi-Fe+Al de 48,21 para 104,37  $\text{mg kg}^{-1}$ , representado mais que duplicação (Tabela 3). Aos 180 DAI, os valores de Pi-Fe+Al permaneceram próximos, de 104,37; 96,79 e 104,11  $\text{mg kg}^{-1}$  aos 180, 270 e 360 DAI, respectivamente (Tabela 3), indicando que, para as condições do tratamento no LVAwf e na ausência de novas aplicações de fósforo, possivelmente não ocorrerão perdas adicionais para essa forma.

Esse resultado reforça o impacto da aplicação de fosfatados em solos com alto teor de óxidos de Fe e Al como o LVAwf do estudo, em que grande parte do P aplicado é complexado após o contato com o solo e, com o tempo, deixa de ser lábil devido aos processos de precipitação (Novais; Smyth, 1999; Pavinato, 2007; Weil; Brady, 2017). No entanto, a aplicação de aditivos pode minimizar essas perdas por precipitação, favorecendo a adsorção do fósforo em formas lábeis apenas nos primeiros 30 dias (Figura 4B). Esse período é particularmente relevante, pois coincide com o início do pico de absorção de fósforo pela maioria das plantas anuais. Portanto, essas tecnologias seriam mais adequadas para culturas anuais ou perenes cuja absorção de P ocorra em período curto, após a aplicação dos fertilizantes.

Aos 90 DAI, a fração de Pi-Ca apresentou incremento significativo com a aplicação de fertilizantes, aditivos e pela interação entre ambos (Tabela 3). Para o MAP, não houve diferença entre a presença ou ausência de aditivos (Figura 4F). Já no ST, a adição de IFCoat e KimcoatBioHP<sup>®</sup> aumentou a precipitação com cálcio em relação ao uso isolado da fonte, resultando em maiores valores que os observados para o MAP nas mesmas condições (Figura 4F). Esse efeito está relacionado à composição dos fertilizantes: enquanto o MAP, por não conter cálcio, acidifica o microambiente pela liberação de amônio, reduzindo a formação de Pi-Ca, o ST, composto por fosfatos de cálcio acidulados, favorece a precipitação (Havlin, 2017; Sample; Soper; Racz, 1980). De forma geral, a fração de Pi-Ca passou de 2,90 para 11,00 mg kg<sup>-1</sup> entre 30 e 90 DAI, refletindo a dinâmica observada nas demais frações. A ausência de plantas para absorver o P liberado, somada à dissolução gradual dos fertilizantes, ao efeito dos aditivos e às características do LVAwf, contribuiu para a transformação do P em formas menos disponíveis, formando um “legado” no solo (Carmo; Caballero; Alves, 2023; Pavinato *et al.*, 2020; Withers *et al.*, 2018).

Nas avaliações realizadas, somente aos 90 DAI houve correlação significativa entre o Po-mic e as demais frações de P associada a matéria orgânica (Tabela 4). A partir dos 180 DAI, essa correlação deixou de ocorrer no LVAwf avaliado. A adição de fertilizantes, aumentando a disponibilidade de nutrientes como N, P e Ca, o que estimula a atividade microbiana no solo. No entanto, na ausência de plantas, essa atividade é interrompida (Moreira; Siqueira, 2006), explicando a ausência de correlação entre o Po-mic e as demais frações de P orgânico a partir dos 180 DAI.

A principal correlação observada foi que o aumento do Po-mic, indicativo de maior atividade microbiana, esteve associado à redução do Po-lábil (Tabela 4). O Po-Lábil é composto majoritariamente por compostos orgânicos de baixa recalcitrância, e que possivelmente serviram de substrato para o desenvolvimento dos microrganismos (Brookes; Powlson; Jenkinson, 1982; He *et al.*, 2023). No mesmo período, observou-se aumento do Po-Mlábil (Tabela 4), sugerindo que essa fração seja o produto dos processos mediados pela atividade microbiana.

Entre a aplicação dos fertilizantes até os 90 DAI, as transformações na fração orgânica de fósforo no solo resultaram no aumento do conteúdo de P na fração orgânica total, passando de 21,04 mg kg<sup>-1</sup> aos 30 dias para 55,85 e 77,95 mg kg<sup>-1</sup> aos 90 e 180 dias, respectivamente (Tabela 3). O principal incremento foi observado na fração Po-Mlábil, confirmando que esta é a fração originada pelos processos de transformação

mediados por microrganismos, mesmo na ausência de plantas (Tabela 4). A partir dos 180 DAI, os valores de Po-mic tornaram-se nulos ou muito próximos de zero (Tabela 4).

**Tabela 4.** Coeficientes de correlação (r) entre o Po-mic e as frações de P orgânico lábil (Po-Lábil), moderadamente lábil (Po-MLábil) e não lábil (Po-NLábil) e os teores médios de P em cada fração orgânica em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf) incubado com MAP e ST com e sem aditivos por 30, 90, 180, 270 e 360 dias.

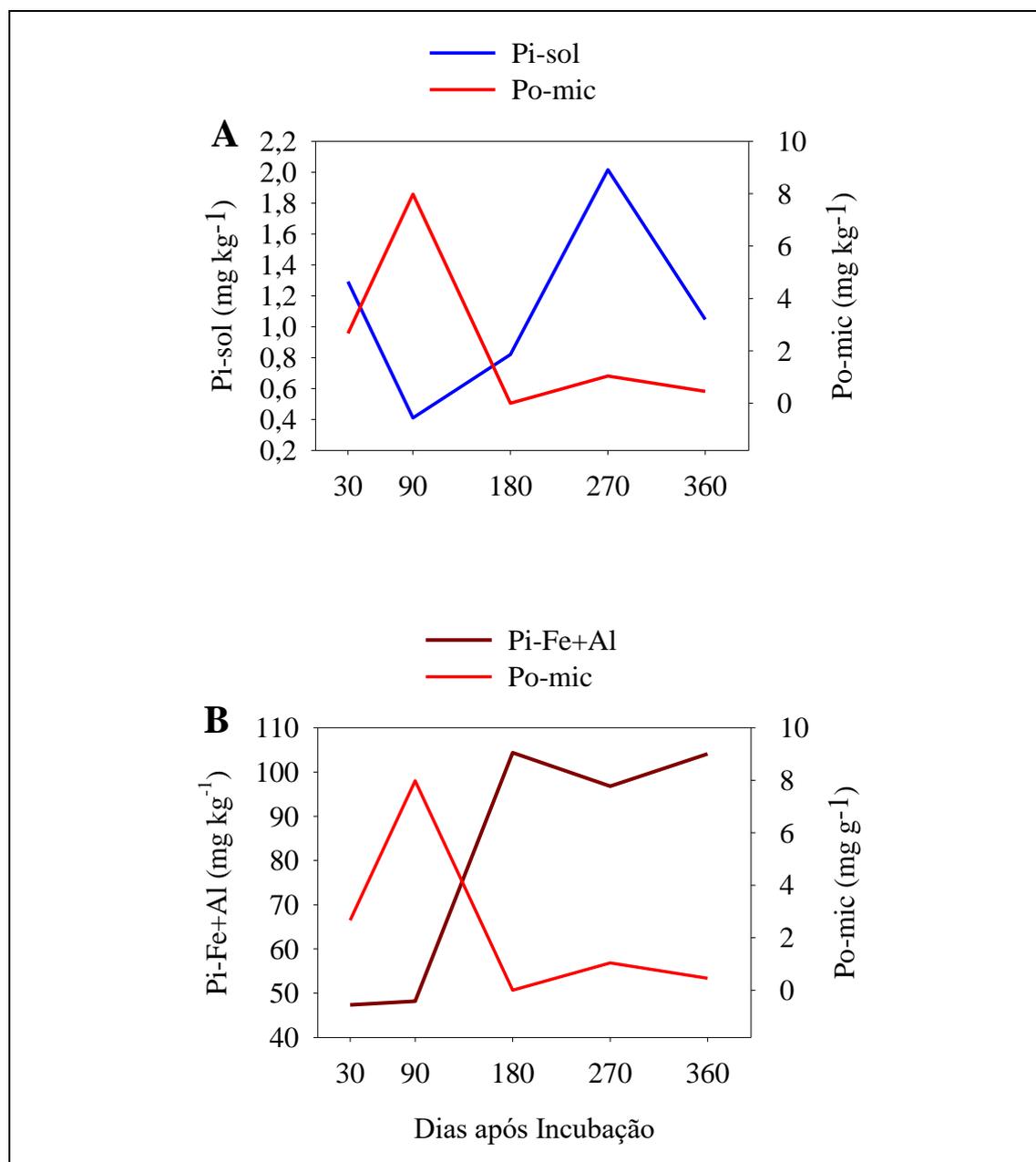
Frações	Dias de Incubação				
	30	90	180	270	360
	Po-mic	Po-mic	Po-mic	Po-mic	Po-mic
<b>Coeficientes de Correlação (r)</b>					
<b>Po-Lábil</b>	-0,36 <sup>ns</sup>	-0,46*	0,00 <sup>ns</sup>	-0,21 <sup>ns</sup>	-0,10 <sup>ns</sup>
<b>Po-MLábil</b>	-0,18 <sup>ns</sup>	0,51**	0,00 <sup>ns</sup>	-0,01 <sup>ns</sup>	-0,07 <sup>ns</sup>
<b>Po-Nlábil</b>	-0,17 <sup>ns</sup>	-0,15 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>
<b>Teores médios (mg kg<sup>-1</sup>)</b>					
<b>Po-Lábil</b>	5,04	8,74	13,59	3,50	0,22
<b>Po-mic</b>	2,67	7,98	0,00	1,04	0,45
<b>Po-MLábil</b>	0,0	38,29	58,41	79,04	2,42
<b>Po-NLábil</b>	13,20	0,84	5,95	11,90	0,00
<b>Po-Total</b>	21,04	55,85	77,95	95,48	3,09

\* e \*\*, “r” significativo à 5 e 1%, respectivamente.

Entre 30 e 180 dias após incubação, as frações do Pi-solução e do Po-mic demonstram comportamento inverso, com aumento acompanhado da redução da outra (Figura 6A), com tendência semelhante, mas de magnitude oposta, após os 180 DAI. Esse padrão indica que, após a aplicação dos fertilizantes, há estímulo à atividade da microbiota, promovendo a imobilização do P da solução, com pico observado até os 90 dias. A partir desse ponto, a atividade microbiana diminui (Po-mic), possivelmente em função da redução da disponibilidade de substrato e, ou, da morte dos microrganismos, resultando na liberação do P anteriormente imobilizado de volta à solução do solo (Figura 6A). Com o retorno do P à solução, os processos de interação do P inorgânico com os componentes do solo são reativados, especialmente os óxidos de Fe e Al. Isso resulta em aumento das perdas por precipitação, evidenciando que a liberação do P em solução, decorrente da redução da atividade microbiana, favorece novamente o aumento das perdas de P precipitado com Fe e Al (Figura 6B).

Considerando as frações orgânicas, após 90 dias de incubação, observou-se redução da fração orgânica lábil com a aplicação dos aditivos KimcoatBioHP® e IFCoat, em contraste com os tratamentos sem aditivo e o controle (Figura 5D). Esse comportamento está correlacionado ao aumento concomitante do fósforo orgânico na

massa microbiana (Po-mic), que passou de 2,67 para 7,98 mg kg<sup>-1</sup> (Tabela 4), especialmente na combinação do aditivo IFCoat com o MAP (Figura 5E).



**Figura 6.** Relação entre os valores médios de Po-mic com Pi-solução (A) e Pi-Fe+Al (B) em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférico (LVAwf) dos 30 aos 360 dias de incubação com MAP, ST com e sem tratamento com aditivos.

A imobilização de P na biomassa microbiana pode estar associada à redução observada na fração Pi-Fe+Al aos 30 DAI (Figura 4B), em que o tratamento MAP com IFCoat apresentou os menores valores dessa fração. Esse efeito também é evidenciado na Figura 6B, em que o aumento do Pi-Fe+Al ocorre apenas após os 90 dias, coincidindo com a redução da atividade microbiana.

Esses resultados indicam que, no LVAwf, a manutenção de elevada atividade microbiana é essencial para reduzir perdas de P por precipitação com Fe e Al. A microbiota transforma o Pi em solução em P orgânico, que pode ser liberado gradualmente, constituindo-se como o principal legado de fósforo com potencial de uso futuro, contribuindo para uma agricultura mais sustentável (Moreira; Siqueira, 2006; Pavinato *et al.*, 2020).

A aplicação de MAP apresentou maior valor de Po-MLábil em comparação com o ST, aos 90 DAI (Figura 5F), evidenciando que o P liberado por mineralização pode estar sendo retido em formas orgânicas de estabilidade intermediária. Entre os aditivos, o IFCoat destacou-se em comparação ao aditivo KimcoatBioHP® e sem aditivo, apresentando maior valor de Po-MLábil (Figura 5F). A evolução da fração Po-MLábil, de 0,0 mg kg<sup>-1</sup> aos 30 DAI para 38,29 mg kg<sup>-1</sup> aos 90 DAI (Tabela 3), destaca o papel positivo dos aditivos, principalmente do IFCoat na imobilização de P proveniente de fontes solúveis em frações orgânicas de média estabilidade. Essa dinâmica pode contribuir para a redução das perdas por fixação de fósforo em formas inorgânicas menos lábeis, típicas de solos tropicais.

Por outro lado, a fração Po-Nlábil, embora não tenha sido afetada pelos tratamentos, apresentou redução após os 90 dias de incubação, passando de 13,20 para 0,84 mg kg<sup>-1</sup> em relação à avaliação aos 30 DAI (Tabela 3). Isso indica que, apesar de maior resistência à mineralização, essa fração pode ser transformada sob condições específicas.

Aos 180 DAI, houve efeito na fração Pi-solução pela aplicação de fertilizantes, aditivos e pela interação entre ambos, com pequeno aumento em relação aos 90 DAI, passando de 0,41 para 0,57 mg kg<sup>-1</sup> (Tabela 3), embora os valores ainda sejam considerados baixos para solos agrícola, permanecendo abaixo do limite observado em solos férteis, que geralmente apresentam teores acima de 1 mg kg<sup>-1</sup> de Pi-solução (Condron; Tiessen, 2005; Novais; Smyth, 1999). No tratamento com ST, a aplicação do aditivo KimcoatBioHP® resultou nos maiores valores de Pi-solução em comparação ao IFCoat e a aplicação sem aditivo (Figura 3F). Para o MAP, não houve diferença entre os aditivos, porém a aplicação com IFCoat levou à valores de Pi-solução superiores àqueles observados para a combinação de ST com o mesmo aditivo (Figura 3F).

O fósforo inorgânico lábil, aos 180 DAI, foi alterado pela aplicação de aditivos e pela interação desses com os fertilizantes (Tabela 5). A aplicação de ST com o aditivo KimcoatBioHP® resultou em valores de Pi-Lábil superiores ao controle e combinação de

MAP com o mesmo aditivo (Figura 3G). Em contrapartida, a aplicação de MAP com IFCoat, promoveu maior valor de Pi-Lábil em comparação à aplicação de ST com IFCoat, diferindo também do controle (Figura 3G). No caso do MAP, ambos os aditivos (IFCoat ou KimcoatBioHP<sup>®</sup>) elevaram os valores de Pi-Lábil (Figura 3G). Enquanto para o ST, a adição com KimcoatBioHP<sup>®</sup> proporcionou os maiores valores entre os tratamentos com aditivos (Figura 3G).

Esses resultados sugerem que o aditivo IFCoat, quando combinado ao ST, tende a gerar menor quantidade de Pi-Lábil em relação à aplicação com MAP, demonstrando maior compatibilidade com fontes de alta solubilidade, como o MAP. Além disso, considerando a redução das perdas por precipitação com Fe e Al, o fósforo liberado em solução nos tratamentos que associam fontes fosfatadas a aditivos pode favorecer a adsorção do ânion fosfato livre em formas lábeis, prontamente disponíveis para retornar à solução do solo (Guelfi *et al.*, 2022; Teixeira *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2022).

A partir de 180 DAI, a aplicação de aditivos deixou de interferir na fração Pi-NLábil em um LVAwf (Tabela 3; Figuras 3H e 3L). Nesse período, observou-se efeito significativo apenas dos fertilizantes, com maiores valores de Pi-NLábil resultantes da aplicação de MAP (155,40 mg kg<sup>-1</sup>), em comparação ao ST (113,34 mg kg<sup>-1</sup>), diferindo também do solo sem adubação fosfatada (Figura 3H).

Em solos tropicais, altamente intemperizados como o LVAwf, que possuem alta capacidade de adsorção de P, a aplicação de fontes fosfatadas de alta solubilidade pode favorecer o aumento das frações não lábeis de P, com posterior evolução para frações oclusas em um processo lento e contínuo (Fixen; Grove, 1990; Novais; Smyth, 1999).

A adsorção específica de P, inicialmente em ligações mononucleadas e posteriormente, em formas binucleadas, estabilizou-se a partir dos 180 DAI (Tabela 3). Após esse período, houve diferenças apenas entre os tratamentos fatoriais e o tratamento controle. Para Pi-NLábil, aos 360 DAI, o tratamento com fertilizantes apresentou valores superiores (334,63 mg kg<sup>-1</sup>) ao controle (194,17 mg kg<sup>-1</sup>) (Figura 3L). Da mesma forma, Pi-ocluso aos 270 DAI, os fertilizantes resultaram em maior acúmulo dessa fração (418,25 mg kg<sup>-1</sup>) em relação ao controle (308,51 mg kg<sup>-1</sup>) (Figura 4H).

Esses resultados demonstram que o P aplicado via fontes externas tende a ser gradualmente fixado em frações menos disponíveis, evidenciando um processo lento de adsorção (Novais; Smyth, 1999; Parfitt, 1978; Weil; Brady, 2017). Embora as frações Pi-NLábil e Pi-ocluso representem um “legado” de fósforo no solo, sua disponibilização é limitada no curto prazo, pois a liberação depende de transformações físico-químicas e

biogeoquímicas de baixa velocidade (Barrow, 1986; Condrón; Tiessen, 2005; Pavinato *et al.*, 2020). Dessa forma, os tratamentos avaliados não foram capazes de reduzir a fixação do P nessas frações nem de favorecer a remobilização progressiva, reforçando a necessidade de estratégias de manejo que mantenham maior proporção de P em formas lábeis (Guelfi *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022).

A partir dos 180 dias de incubação até o final das análises aos 360 DAI, foi observada uma tendência de estabilização nas frações de fósforo inorgânico menos disponíveis (Pi-Fe+Al, Pi-Ca e Pi-ocluso) independentemente de fertilizantes, aditivos ou suas combinações. A predominância da fração Pi-Fe+Al reforça o comportamento típico de solos altamente intemperizados, como o LVAwf, caracterizado pela elevada capacidade de precipitação com Fe e Al livres em solução (Novais; Smyth; Nunes, 2007). A fração de Pi-Ca manteve pouco expressiva, como esperado para esse tipo de solo, sendo as variações observadas até 90 DAI (Tabela 3), provavelmente reflexo transitório da aplicação de corretivos ou da composição dos fertilizantes.

Embora aos 270 DAI tenha ocorrido diferença significativa entre os tratamentos para Pi-Ca (Figura 4J), com maior perda de P precipitado com Ca quando tratado o MAP com o IFCoat (Figura 5J), os valores permaneceram baixos (2,05 mg kg<sup>-1</sup>). Da mesma forma, o Pi-ocluso, embora tenha aumentado gradualmente até 270 dias (402,6 mg kg<sup>-1</sup>), foi reduzido aos 360 dias (148,80 mg kg<sup>-1</sup>), evidenciando o caráter lento e progressivo da oclusão do fósforo em óxidos de Fe e Al (Fixen; Grove, 1990; Novais; Smyth, 1999).

Esses resultados indicam que, após 180 dias, a dinâmica dessas frações tornou-se menos responsiva aos manejos, reforçando a necessidade de focar em formas mais lábeis e biodisponíveis de P para aumentar a eficiência do uso do nutriente em solos tropicais (Barrow, 1986; Condrón; Tiessen, 2005; Guelfi *et al.*, 2022; Novais; Smyth, 1999; Parfitt, 1978). Importante ressaltar que o uso de sistemas de cultivo que mantêm plantas vivas pode ser uma técnica eficiente para reduzir as perdas de P residual para frações menos lábeis, associando-o à matéria orgânica, que pode contribuir no futuro para o tamponamento do nutriente em solução (Conte; Anghinoni; Rheinheimer, 2003; Moreira; Siqueira, 2006; Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008).

A fração de Po-Lábil alterou com os fertilizantes, aditivos e com a interação entre ambos, aos 180 DAI (Tabela 3). Para o MAP, a adição dos aditivos IFCoat e KimcoatBioHP<sup>®</sup>, resultaram em menores valores de Po-Lábil em comparação à aplicação sem aditivo, além de diferirem do controle (Figura 5G). No caso do ST, não foram observadas diferenças entre os aditivos e, apenas a combinação com KimcoatBioHP<sup>®</sup> não

diferiu do controle (Figura 5G). Não houve diferença significativa entre MAP e ST, na ausência de aditivos (Figura 5G). Contudo, quando associados aos aditivos, o MAP apresentou menores valores de Po-Lábil em relação ao ST (Figura 5G).

Aos 270 DAI, também houve efeito da interação entre fertilizantes e aditivos no Po-Lábil (Tabela 3). Porém, com redução expressiva e sem diferença do tratamento controle (Tabela 3). Somente para o MAP, a aplicação do aditivo KimcoatBioHP® se destacou dos demais aditivos, e da combinação ST com o mesmo aditivo (Figura 5J).

Aos 360 DAI, não houve efeito dos tratamentos sobre o Po-Lábil (Tabela 3). Além disso, os valores obtidos com a aplicação dos fertilizantes foram inferiores aos do tratamento controle (Figura 5M).

A fração do Po-mic não apresentou variações significativas em resposta aos tratamentos no período de 180 até 360 DAI (Tabela 3 e Figura 5). Essa estabilidade pode estar associada às características físico-químicas dos Latossolos, que, por serem altamente intemperizados e ricos em óxidos de Fe e Al, apresentam elevada capacidade de fixação de P, resultando em baixa disponibilidade do nutriente no solo (Condon; Tiessen, 2005; Parfitt, 1978; Santos *et al.*, 2018). Além disso, a ausência de plantas durante o experimento pode ter contribuído para a baixa atividade microbiana, uma vez que a rizosfera é o principal ambiente de estímulo à microbiota do solo. Esse resultado corrobora a afirmação de que um solo sem plantas assemelha-se a um deserto nutricional, com baixa ciclagem e biodisponibilidade de nutrientes, ou seja, a ciclagem dos nutrientes depende de grande diversidade biológica (Moreira; Siqueira, 2006).

A média total da fração do Po-MLábil aumentou de 38,3 mg kg<sup>-1</sup> aos 90 DAI para 58,41 mg kg<sup>-1</sup> aos 180 DAI, momento em que também foi observada alteração com a aplicação de aditivos além de interação significativa entre fertilizantes e aditivos (Tabela 3). Para a fonte MAP, não houve diferença entre os aditivos, porém a combinação com KimcoatBioHP® resultou em maiores valores de Po-MLábil em comparação ao ST com o mesmo aditivo (Figura 5H). Entretanto, para o ST, a aplicação do aditivo IFCoat promoveu maior acúmulo de Po-MLábil em relação à combinação de ST sem aditivo, sendo que ambos superaram os valores obtidos a aplicação de ST com KimcoatBioHP® (Figura 5H). Além disso, o ST aplicado com o aditivo IFCoat e aplicado sem aditivo, apresentaram maiores valores da fração Po-MLábil em comparação as aplicações de MAP com IFCoat e sem aditivo (Figura 5H). No entanto, aplicações de MAP com IFCoat ou com KimcoatBioHP®, e as aplicações de ST com IFCoat ou sem aditivo apresentaram valores de Po-MLábil abaixo do tratamento controle (Figura 5H).

Com o MAP, observa-se que o aumento do Po-MLábil com o uso dos aditivos contrasta com a redução do Po-Lábil dos mesmos tratamentos (Tabela 4). Essa redução pode estar associada à transformação do Po-Lábil em compostos mais recalcitrantes, mediada por microrganismos, corroborando com os resultados observados aos 90 DAI, quando houve aumento do Po-MLábil e redução do Po-Lábil, acompanhados de elevação do Po-mic (Tabela 4) (Condrón; Tiessen, 2005; Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000).

A partir dos 180 DAI o Po-MLábil passou a mostrar tendência de estabilização (Tabela 3). Embora, aos 270 DAI, tenha ocorrido novo efeito significativo da aplicação isolada dos fertilizantes, em que o MAP apresentou maior valor de Po-MLábil que o ST (Figura 5K), comportamento já observado aos 90 DAI (Figura 5F), e ambos diferindo do controle. No entanto, aos 360 DAI não foram mais observadas diferenças estatísticas, indicando que essa fração orgânica estabilizou no solo após 270 dias de incubação, com pouca influência dos aditivos. Essa evolução está alinhada com a dinâmica de outras frações, como do Po-mic, que apresentou teores muito baixos ao longo da incubação (Tabela 3), refletindo limitação da atividade microbiana (Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000). Da mesma forma as frações inorgânicas menos lábeis (Pi-NLábil e Pi-ocluso) também se estabilizaram aos 180 DAI, indicando que o Po-MLábil atua como ponte transitória entre as formas mais disponíveis, como o Po-lábil, e as mais recalcitrantes, sendo influenciado pelas fontes de fósforo aplicadas e pela atividade microbiana nas fases iniciais do ciclo (Condrón; Tiessen, 2005; Havlin, 2017; Hou *et al.*, 2018; McLaren *et al.*, 2017; Parfitt, 1978; Tiessen; Moir, 2007).

Aos 180 DAI, o Po-NLábil foi influenciado pela aplicação de aditivos de forma isolada, e com a interação entre aditivos e fertilizantes (Tabela 3). Na aplicação do MAP, não houve diferença entre os aditivos (Figura 5I). Contudo, para o ST, a adição do aditivo IFCoat resultou em maiores valores de Po-NLábil em comparação aos demais aditivos (Figura 5I). Além disso, a aplicação de ST com o aditivo IFCoat promoveu maior acúmulo de Po-NLábil que a aplicação de MAP com o mesmo aditivo (Figura 5I). Apenas o tratamento do ST com o aditivo IFCoat aumentou significativamente os teores de Po-NLábil ( $11,49 \text{ mg kg}^{-1}$ ) em relação ao solo sem adubação fosfatada ( $4,41 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Essa forma de fósforo, embora não prontamente disponível, pode representar um legado potencialmente acessível às plantas a médio ou longo prazo.

Aos 270 DAI, o Po-NLábil voltou a apresentar alterações significativas em resposta à aplicação dos fertilizantes, dos aditivos e da interação entre ambos (Tabela 6). No entanto, os teores foram nulos nas combinações entre MAP e aditivos, ST sem aditivo

e no tratamento controle (Figura 5L). Somente os tratamentos com ST associados aos aditivos KimcoatBioHP® (57,40 mg kg<sup>-1</sup>) e IFCoat (26,04 mg kg<sup>-1</sup>) resultaram em acúmulo detectável dessa fração (Figura 5L).

Após 360 dias de incubação, os teores de Po-NLábil não foram mais detectados (Tabela 7), impossibilitando a verificação de diferenças entre os tratamentos. Embora o Po-NLábil seja uma fração considerada estável e de difícil transformação (Condrón; Tiessen, 2005; Tiessen; Moir, 2007), os valores nulos ao final do período sugerem possível mineralização microbiana completa, com posterior conversão para formas inorgânicas menos acessíveis (Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000).

### 3.4 Conclusão

O Latossolo Vermelho-Amarelo acriférrico apresentou elevada capacidade de fixação do fósforo, reflexo da forte presença de goethita e gibbsita na fração argila e do avançado grau de intemperismo. Essa mineralogia altamente reativa promoveu a rápida conversão do P aplicado, sobretudo do MAP, em formas menos disponíveis, reduzindo a persistência do nutriente no sistema. Apesar desse cenário restritivo, os aditivos demonstraram potencial para modular a dinâmica do P, especialmente quando associados ao MAP. O KimcoatBioHP® favoreceu a disponibilidade inicial ao elevar o Pi-solução, enquanto o IFCoat reduziu a retrogradação e prolongou a permanência do P em formas lábeis, além de estimular a imobilização microbiana e o aumento das frações orgânicas lábeis.

A trajetória temporal do P revelou uma janela crítica de aproveitamento até aproximadamente 90 dias, período em que ocorre intensa imobilização na biomassa microbiana seguida de migração para frações inorgânicas de maior energia de ligação. Após 180 dias, o sistema entrou em fase de estabilização, predominando as frações Pi-Fe+Al, Pi-NLábil e Pi-ocluso, evidenciando a baixa reversibilidade da fixação nesse solo altamente intemperizado.

De modo geral, o MAP associado ao IFCoat mostrou maior eficiência agrônômica no LVAwf, ao equilibrar processos químicos e biológicos e retardar a fixação inicial do P. Já o ST apresentou maior retenção em Pi-Ca e menor resposta aos aditivos. Esses resultados reforçam que, em solos com elevada capacidade tampão e predominância de óxidos de Fe e Al, o manejo mais eficiente envolve fontes solúveis combinadas a revestimentos capazes de modular a liberação do P, ampliando a disponibilidade e contribuindo para o uso mais sustentável do nutriente.

## REFERÊNCIAS

- ACHARY, V. Mohan M. *et al.* Phosphite: a novel P fertilizer for weed management and pathogen control. **Plant Biotechnology Journal**, v. 15, n. 12, p. 1493–1508, 2017.
- ALCARDE, José Carlos. Fertilizantes. *In*: NOVAIS, Roberto Ferreira *et al.* (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa-MG: SBCS, 2007. p. 737–768.
- ALI, N. S.; AL-JUTHERY, H. W. A. The application of nanotechnology for micronutrient in agricultural production (review article). **iraqi journal of agricultural sciences**, v. 48, n. 4, 13 ago. 2017.
- ALLEONI, Luis Reynaldo Ferracciú *et al.* Química dos solos altamente intemperizados. **Química e mineralogia do solo. v. 2: aplicações**, p. 685 il, 2016.
- ALVAREZ V., V. H. NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E. OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, 2000, 25:27-33. (Boletim Informativo).
- ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. *In*: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Orgs.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba/SP: POTAFOS, 2004. p. 537–562.
- ARAÚJO, Brilhar *et al.* **Solubilização de fosfatos e potássio por bactérias rizosféricas - uma revisão.** | EBSCOhost. Disponível em: <<https://openurl.ebsco.com/contentitem/doi:10.31413%2Fnat.v12i4.17576?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:doi:10.31413%2Fnat.v12i4.17576>>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- ARENBERG, Mary R.; LIANG, Xinqiang; ARAI, Yuji. Immobilization of agricultural phosphorus in temperate floodplain soils of Illinois, USA. **Biogeochemistry**, v. 150, n. 3, p. 257–278, 2020.
- ASHRAF, M. N. *et al.* Evaluating Organic Materials Coating on Urea as Potential Nitrification Inhibitors for Enhanced Nitrogen Recovery and Growth of Maize (*Zea mays*). **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 22, n. 5, p. 1102–1108, 2019.
- AUDETTE, Yuki *et al.* Phosphorus binding to soil organic matter via ternary complexes with calcium. **Chemosphere**, v. 260, p. 127624, 1 dez. 2020.
- AZIZ, Tariq *et al.* Phosphorus deficiency in plants: Responses, adaptive mechanisms, and signaling. **Plant Signaling: Understanding the Molecular Crosstalk**, v. 9788132215424, p. 133–148, 1 out. 2014.
- BAI, Yong-Chao *et al.* Soil Chemical and Microbiological Properties Are Changed by Long-Term Chemical Fertilizers That Limit Ecosystem Functioning. **Microorganisms**, v. 8, n. 5, p. 694, 8 maio 2020.
- BALDOTTO, Maribus Altoé; VELLOSO, Ary Carlos Xavier. Eletroquímica de solos modais e de sua matéria orgânica em ambientes tropicais. **Revista Ceres**, v. 61, n. 6, p. 1012–1021, 2014.

BARBOSA, Kássia de Paula. Fontes e formas de aplicação de fertilizantes fosfatados em cultivos consecutivos de soja em Latossolo de alta fertilidade. nov. 2020.

BARROW, N. J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. **Journal of Soil Science**, v. 34, n. 4, p. 733–750, 1983.

BARROW, N. J. Reaction of Anions and Cations with Variable-Charge Soils. *In: Advances in Agronomy*. [S.l.]: Elsevier, 1986. v. 38 p. 183–230.

BARROW, N. J. Soil phosphate chemistry and the P-sparing effect of previous phosphate applications. **Plant and Soil**, v. 397, n. 1–2, p. 401–409, 2015.

BARROW, N. J. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. **Plant and Soil**, v. 410, n. 1–2, p. 401–410, 2017.

BARROW, N. J. *et al.* The soil phosphate fractionation fallacy. **Plant and Soil**, v. 459, n. 1–2, p. 1–11, 1 fev. 2021.

BASINSKI, Jade J. *et al.* Unraveling iron oxides as abiotic catalysts of organic phosphorus recycling in soil and sediment matrices. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 5930, 18 jul. 2024.

BAZANI, José Henrique. **Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto**. Mestrado em Recursos Florestais—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.

BENNETT, Elena M.; SCHIPANSKI, Meagan E. Chapter 8 - The Phosphorus Cycle. *In: WEATHERS, Kathleen C.; STRAYER, David L.; LIKENS, Gene E. (Orgs.). Fundamentals of Ecosystem Science*. [S.l.]: Academic Press, 2013. p. 159–178.

BOLAN, N. S.; WHITE, R. E.; HEDLEY, M. J. A Review of The Use of Phosphate Rocks As Fertilisers For Direct Application in Australia and New Zealand. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 30, n. 2, p. 297–313, 1990.

BOOMSMA, Anne. Structural Equation Modeling: Foundations and Extensions (Advanced Quantitative Techniques in the Social Sciences Series, Vol. 10.) by David Kaplan. **Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal**, v. 10, n. 2, p. 323–331, abr. 2003.

BORGES, W. L. *et al.* Agronomic efficiency of fertilizers with aggregate technology in the Brazilian Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 18, n. 4, p. 1–7, 31 dez. 2023.

BOWMAN, R. A.; VIGIL, M. F. Soil testing for different phosphorus pools in cropland soils of the Great Plains. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 57, n. 6, p. 479–485, nov. 2002.

BRADY, Nyle C.; WEIL, Ray R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. [S.l.]: Bookman, 2013.

BRAOS, L. B. *et al.* Dynamics of phosphorus fractions in soils treated with dairy manure. **Soil Research**, v. 58, n. 3, p. 289–298, 20 jan. 2020.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 14, n. 4, p. 319–329, 1 jan. 1982.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Phosphorus in the soil microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 16, n. 2, p. 169–175, jan. 1984.

BÜNEMANN, E. K. *et al.* Rapid microbial phosphorus immobilization dominates gross phosphorus fluxes in a grassland soil with low inorganic phosphorus availability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 51, p. 84–95, ago. 2012.

BYRNE, Barbara M. **Structural equation modeling with AMOS: basic concepts, applications, and programming**. Second edition (Online-Ausg.) ed. New York: Routledge, 2010.

CAIONE, Gustavo; PRADO, Renato de Mello. **Nutrição e adubação de pastagens**. [S.l.]: Fcav, 2021.

CALHEIROS, A. S. *et al.* Nível crítico de fósforo por diferentes extratores químicos em Neossolo Flúvico alcalino cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 7, n. 4, p. 590–596, 5 dez. 2012.

CARMO, Thiago Rezende Lima Do; CABALLERO, Segundo Sacramento Urquiaga; ALVES, Bruno José Rodrigues. BALANÇO GERAL DE NITROGÊNIO E FÓSFORO NA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA NO PERÍODO DE 1990 A 2020. *In*: ZONTA, Everaldo; PEREIRA, Marcos Gervasio (Eds.). **Agricultura, Mudanças Climáticas e Segurança Alimentar - Anais do VI Simpósio ABC (Argentina-Brasil-Cuba)**. 1. ed. [S.l.]: Atena Editora, 2023. p. 356–361.

CARNEIRO, Leandro Flávio *et al.* Frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um Latossolo com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 483–491, abr. 2011.

CARRINGTON, Damian. Phosphate fertiliser “crisis” threatens world food supply. **The Guardian**, 2019.

CARVALHO, Rui *et al.* Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 3, p. 557–565, 2001.

CEKINSKI, E. Fertilizantes Fosfatados. *In*: CEKINSKI, E. *et al.* (Eds.). **Tecnologia de Produção de Fertilizantes**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990. p. 95–129.

CHAGAS, Wantuir Filipe Teixeira *et al.* Productive characteristics, nutrition and agronomic efficiency of polymer-coated MAP in lettuce crops. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 2, 2015.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, Baltimore. v. 84, p. 133–144, 1957.

CHEN, C. R. *et al.* Effects of afforestation on phosphorus dynamics and biological properties in a New Zealand grassland soil. ***Plant and Soil***, v. 220, n. 1–2, p. 151–163, 2000.

CHIEN, S. H. *et al.* Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. ***Nutrient Cycling in Agroecosystems***, v. 89, n. 2, p. 229–255, 2011.

CHOWDHURY, Rubel Biswas *et al.* Key sustainability challenges for the global phosphorus resource, their implications for global food security, and options for mitigation. ***Journal of Cleaner Production***, v. 140, p. 945–963, jan. 2017.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M. Effects of long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zealand. ***Journal of Soil Science***, v. 40, n. 2, p. 383–395, 1989.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance analysis. ***Journal of Soil Science***, v. 36, n. 2, p. 199–207, 1985.

CONDRON, L. M.; TIESSEN, H. Interactions of organic phosphorus in terrestrial ecosystems. *In*: TURNER, B. L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. S. (Orgs.). ***Organic phosphorus in the environment***. 1. ed. UK: CABI Publishing, 2005. p. 295–307.

CONDRON, Leo M.; NEWMAN, Susan. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. ***Journal of Soils and Sediments***, v. 11, n. 5, p. 830–840, 2011.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. ***Revista Brasileira de Ciência do Solo***, v. 26, n. 4, p. 925–930, dez. 2002.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. ***Revista Brasileira de Ciência do Solo***, v. 27, n. 5, p. 893–900, out. 2003.

CORRÊA, Rossini Mattos; NASCIMENTO, Clístenes Williams Araújo Do; ROCHA, Alexandre Tavares Da. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. ***Acta Scientiarum. Agronomy***, v. 33, n. 1, p. 153–159, 2 mar. 2011.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M. Óxidos de ferro. *In*: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). ***Química e mineralogia do solo***. 1. ed. Viçosa: SBCS, 2009. v. 1 p. 505–572.

COSTA, Karla Samylle De Queiroz *et al.* Fósforo no sistema solo-planta: uma revisão. ***Observatório de la economía latinoamericana***, v. 22, n. 6, p. e5361, 20 jun. 2024.

COSTA, Marlon *et al.* Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus Plantations, Brazil. **Forests**, v. 7, n. 1, p. 15, 2016.

CROSS, Anne Fernald; SCHLESINGER, William H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, v. 64, n. 3–4, p. 197–214, 1995.

DA CRUZ, Diego Fernandes *et al.* Role of Polymeric Coating on the Phosphate Availability as a Fertilizer: Insight from Phosphate Release by Castor Polyurethane Coatings. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 29, p. 5890–5895, 26 jul. 2017.

DA SILVA, Erika Caitano *et al.* Does Structural Equation Modeling Provide a Holistic View of Phosphorus Acquisition Strategies in Soils of Amazon Forest? **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 3, p. 3334–3347, set. 2022.

DE FIGUEIREDO, Cícero Célio *et al.* Polymer-coated phosphate fertilizer and liming on the production and morphological parameters of corn. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 43, n. 3, p. 446–452, 2012.

DO NASCIMENTO, Carlos A. C. *et al.* Phosphorus Mobility and Behavior in Soils Treated with Calcium, Ammonium, and Magnesium Phosphates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, n. 3, p. 622–631, 2018.

DONAGEMMA, Guilherme Kangussu *et al.* Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003–1020, 2016.

DUDA, Gustavo Pereira *et al.* Avaliação da biodisponibilidade de fósforo em diferentes classes de solos do Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 4, p. 1563–1576, 30 ago. 2013.

EISENHAUER, Nico *et al.* From patterns to causal understanding: Structural equation modeling (SEM) in soil ecology. **Pedobiologia**, v. 58, n. 2–3, p. 65–72, mar. 2015.

ELSER, James; BENNETT, Elena. A broken biogeochemical cycle. **Nature**, v. 478, n. 7367, p. 29–31, 2011.

EVERAERT, Maarten *et al.* Agronomic Effectiveness of Granulated and Powdered P-Exchanged Mg-Al LDH Relative to Struvite and MAP. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 32, p. 6736–6744, 16 ago. 2017.

FAGERIA, Nand Kumar. **The Use of Nutrients in Crop Plants**. 0. ed. [S.l.]: CRC Press, 2009.

FALCÃO, Newton Paulo De Souza; SILVA, José Risonei Assis Da. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 3, p. 337–342, 2004.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt: Pacote experimental designs.**, 2021.

FIXEN, P. E.; GROVE, J. H. Testing Soils for Phosphorus. *In*: WESTERMAN, R. I. (Ed.). **Soil Testing and Plant Analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 1990. v. 3 p. 141–180.

FONSECA, D. M., ALVAREZ V., V. H., NEVES, J. C. L., GOMIDE, J. A., NOVAIS, R. F. & BARROS, N. F. Níveis críticos de fósforo em amostras de solos para estabelecimento de *Andropogon gayanus*, *Brachiaria decumbens*, *Hyparrhenia rufa*. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Campinas v.12, n. 4, p. 49-58, 1988.

FOX, John; NIE, Zhenghua; BYRNES, Jarrett. **Sem: Structural equation models**. , 2024. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=sem>>

FOX, Thomas R. *et al.* Phosphorus Nutrition of Forest Plantations: The Role of Inorganic and Organic Phosphorus. *In*: BÜNEMANN, Else; OBERSON, Astrid; FROSSARD, Emmanuel (Orgs.). **Phosphorus in Action**. Soil Biology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. v. 26 p. 317–338.

FREITAS, Idelfonso Colares De. **Atributos de um Neossolo Quartzarênico da pré-Amazônia sob agroecossistemas de produção familiar**. Goiânia-GO: UFG, 2013.

GAMA-RODRIGUES, A. C. *et al.* An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. **Biogeochemistry**, v. 118, n. 1–3, p. 453–469, 17 abr. 2014.

GAO, Shengchao *et al.* Effects of humic acid–enhanced phosphate fertilizer on wheat yield, phosphorus uptake, and soil available phosphorus content. **Crop Science**, v. 63, n. 2, p. 956–966, 1 mar. 2023.

GATIBONI, Luciano Colpo *et al.* Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 691–699, ago. 2007.

GATIBONI, Luciano Colpo *et al.* Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos líquidos de suínos em pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1753–1761, 2008.

GATIBONI, Luciano Colpo; BRUNETTO, Gustavo; KAMINSKI, João. **Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações**. 2013.

GATIBONI, Luciano Colpo; KAMINSKI, João; SANTOS, Danilo Rheinheimer dos. Modificações nas formas de fósforo do solo após extrações sucessivas com Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 363–371, 2005.

GRACE, James B. **Structural Equation Modeling and Natural Systems**. 1. ed. Cambridge: University Press, 2006.

GRACE, James B.; BOLLEN, Kenneth A. Representing general theoretical concepts in structural equation models: the role of composite variables. **Environmental and Ecological Statistics**, v. 15, n. 2, p. 191–213, jun. 2008.

GUEDES, Rafael Silva *et al.* Adsorption and desorption kinetics and phosphorus hysteresis in highly weathered soil by stirred flow chamber experiments. **Soil and Tillage Research**, v. 162, p. 46–54, set. 2016.

GUELFI, Douglas *et al.* Innovative Phosphate Fertilizer Technologies to Improve Phosphorus Use Efficiency in Agriculture. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 21, 1 nov. 2022.

GUELFI, Douglas Ramos *et al.* Monoammonium phosphate coated with polymers and magnesium for coffee plants. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 3, p. 261–270, 1 maio 2018.

GUO, Fengmao; YOST, Russell S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Science**, v. 163, n. 10, p. 822–833, 1998.

HAIR, Joseph F. *et al.* Multivariate data analysis (8. Baskı). **Eight Edition, Cengage: Learning EMEA**, 2019.

HAIR JR., Joseph F. *et al.* **Análise Multivariada De Dados**. 6. ed. *[S.l.]*: Bookman, 2009.

HANSEL, Fernando Dubou. **Fertilizantes fosfatados aplicados a lanço e em linha na cultura da soja sob semeadura direta**. Unpublished, , 2013. Disponível em: <<http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.3641.7529>>. Acesso em: 12 ago. 2025

HANYABUI, Emmanuel *et al.* Phosphorus sorption in tropical soils. **AIMS Agriculture and Food**, v. 5, n. 4, p. 599–616, 2020.

HAVLIN, John L. **Soil Fertility and Fertilizers**. 8. ed. *[S.l.]*: Pearson India, 2017.

HAWKINS, J. M. B. *et al.* The effect of soil organic matter on long-term availability of phosphorus in soil: Evaluation in a biological P mining experiment. **Geoderma**, v. 423, p. 115965, 1 out. 2022.

HAYNES, R. J.; MOKOLOBATE, M. S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 59, n. 1, p. 47–63, jan. 2001.

HE, Xianjin *et al.* Global patterns and drivers of phosphorus fractions in natural soils. **Biogeosciences**, v. 20, p. 4147–4163, 2023.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in Inorganic and Organic Soil Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 5, p. 970–976, set. 1982.

HELFENSTEIN, Julian *et al.* Soil solution phosphorus turnover: derivation, interpretation, and insights from a global compilation of isotope exchange kinetic studies. **Biogeosciences**, v. 15, n. 1, p. 105–114, 8 jan. 2018.

HINGSTON, F. J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite - I: the role of the proton in determining adsorption envelopes. **Journal of Soil Science**, v. 23, p. 177–191, 1972.

HOU, Enqing *et al.* A structural equation model analysis of phosphorus transformations in global unfertilized and uncultivated soils. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 30, n. 9, p. 1300–1309, set. 2016.

HOU, Enqing *et al.* Solubility of phosphorus in subtropical forest soils as influenced by low-molecular organic acids and key soil properties. **Geoderma**, v. 313, p. 172–180, 1 mar. 2018.

HOYLE, Rick H.; SMITH, Gregory T. Formulating clinical research hypotheses as structural equation models: A conceptual overview. **Journal of Consulting and Clinical Psychology**, v. 62, n. 3, p. 429–440, 1994.

HU, Li-tze; BENTLER, Peter M. Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. **Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal**, v. 6, n. 1, p. 1–55, 1999.

ICHINOSE, Yuri *et al.* How do reactive aluminum and iron phases control soil organic carbon and phosphate adsorption capacity in agricultural topsoils across Japan? **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 71, n. 1, p. 38–52, 2 jan. 2025.

IKHAJIAGBE, Beckley *et al.* RETRACTED: Major phosphorus in soils is unavailable, yet critical for plant development. **Notulae Scientia Biologicae**, v. 12, n. 3, p. 500–535, 29 set. 2020.

IRIONDO, José M.; ALBERT, María J.; ESCUDERO, Adrián. Structural equation modelling: an alternative for assessing causal relationships in threatened plant populations. **Biological Conservation**, v. 113, n. 3, p. 367–377, out. 2003.

JASINSKI, Stephen. **Phosphate Rock, Mineral Commodity Summaries 2025.** , 2025.

JASINSKI, Stephen M. **Phosphate Rock, Mineral Commodity Summaries 2021.** , 2021.

JOLLIFFE, I. T. **Principal Component Analysis.** New York: Springer-Verlag, 2002.

JÖRESKOG, Karl G.; SÖRBOM, Dag. Recent Developments in Structural Equation Modeling. **Journal of Marketing Research**, v. 19, n. 4, p. 404–416, nov. 1982.

KAFLE, Arjun *et al.* Harnessing Soil Microbes to Improve Plant Phosphate Efficiency in Cropping Systems. **Agronomy**, v. 9, n. 3, p. 127, 8 mar. 2019.

KAISER, Henry F. The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 141–151, abr. 1960.

KAPLAN, D. **Structural equation modeling: foundations and extensions.** Thousand Oaks, California: Sage Publications, 2000. v. 10

KASSEM, Ihsane *et al.* Biodegradable all-cellulose composite hydrogel as eco-friendly and efficient coating material for slow-release MAP fertilizer. **Progress in Organic Coatings**, v. 162, p. 106575, 1 jan. 2022.

KLIN, Rex B. **Principles and practice of structural equation modeling, 4th ed.** New York, NY, US: The Guilford Press, 2016. p. xvii, 534

KLOTZBÜCHER, Anika *et al.* Testing mechanisms underlying the Hedley sequential phosphorus extraction of soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 182, n. 4, p. 570–577, ago. 2019.

KORKMAZ, Selcuk; GOKSULUK, Dincer; ZARARSIZ, Gokmen. MVN: An R Package for Assessing Multivariate Normality. **The R Journal**, v. 6, n. 2, p. 151, 2014.

KOUR, Divjot *et al.* Biodiversity, current developments and potential biotechnological applications of phosphorus-solubilizing and -mobilizing microbes: A review. **Pedosphere**, v. 31, n. 1, p. 43–75, fev. 2021.

LÊ, Sébastien; JOSSE, Julie; HUSSON, François. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, p. 1–18, 2008.

LEHNINGER, Albert L. **Short course in biochemistry.** New York: Worth Publishers, 1973.

LEITE, Jacqueline Nayara Ferraça *et al.* Frações orgânicas e inorgânicas do fósforo no solo influenciadas por plantas de cobertura e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 11, p. 1880–1889, nov. 2016.

LIMA, Regina Lúcia Félix De Aguiar. Micorrizas arbusculares e absorção de fósforo em função da capacidade de fixação de fósforo do solo e da competição com a microbiota. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1062–1079, 1 jun. 2020.

LINDSAY, W. L.; LEHR, J. R.; STEPHENSON, H. F. Nature of the Reactions of Monocalcium Phosphate Monohydrate in Soils: III. Studies with Metastable Triple-Point Solution. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 5, p. 342–345, 1959.

LINDSAY, W. L.; STEPHENSON, H. F. Nature of the Reactions of Monocalcium Phosphate Monohydrate in Soils: II. Dissolution and Precipitation Reactions Involving Iron, Aluminum, Manganese, and Calcium. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 1, p. 18–22, 1959.

LINDSAY, Willard L. **Chemical Equilibria in Soils.** New York: John Wiley & Sons, 1979.

LISHINSKI, Alex. lavaanPlot: Path diagrams for Lavaan models via DiagrammeR. **R package version 0.6**, v. 2, p. 2021, 2021.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; CUNHA, J. F. da. **Superfosfato Simples.** São Paulo: Gráfica Nagy, 2010.

LU, Chun *et al.* Phosphorus Dynamics in Managed and Natural Soils: SEM-PLS Analysis of Vaccinium, Forest, and Grassland Ecosystems. **Plants**, v. 14, n. 2, p. 189, jan. 2025.

LUO, Yuan-Jun; YUAN, Da-Gang; HUANG, Lai-Ming. Soil phosphorus fraction and availability dynamics along a 2-million-year soil chronosequence in northern Hainan Island, China. **Geoderma**, v. 448, p. 116957, ago. 2024.

MACDONALD, Graham K. *et al.* Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 7, p. 3086–3091, 2011.

MALAVOLTA, E. *et al.* Estudos sobre a nutrição mineral do arroz: XV. absorção radicular e foliar do radiofosforo pelas variedades IAC-47 e IAC-435. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 38, n. 2, p. 695–721, 1981.

MARSCHNER, Horst. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed ed. London Waltham, MA: Academic Press, 2012.

MARTINAZZO, Rosane *et al.* Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 563–570, jun. 2007.

MCLAREN, Timothy I. *et al.* The chemical nature of organic phosphorus that accumulates in fertilized soils of a temperate pasture as determined by solution<sup>31</sup>P NMR spectroscopy. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 180, n. 1, p. 27–38, fev. 2017.

MIGNACCA, Flávia Alessandra. **Fracionamento de fósforo de um Argissolo Vermelho distroférico submetido a manejos de correção e adubação em sistema de integração lavoura-pecuária. 2016**. Universidade do Oeste Paulista, UNOESTE, Brasil, 2016. Disponível em: <<http://bdt.d.unoeste.br:8080/jspui/handle/jspui/1046>>

MIHAILESCU, E. *et al.* Phosphorus balance and use efficiency on 21 intensive grass-based dairy farms in the South of Ireland. **The Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 3, p. 520–537, 2015.

MIRABELLO, M. J. *et al.* Soil phosphorus responses to chronic nutrient fertilisation and seasonal drought in a humid lowland forest, Panama. **Soil Research**, v. 51, n. 3, p. 215, 2013.

MIRANDA, Li Chaves. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados de diferentes tempos de liberação aplicados em solos de textura contrastante**. Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal—[S.l.]: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, 2023.

MITCHELL, R. J. Testing Evolutionary and Ecological Hypotheses Using Path Analysis and Structural Equation Modelling. **Functional Ecology**, v. 6, n. 2, p. 123, 1992.

MME. **Relatório Técnico 54 - Perfil do Enxofre**. Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2009.

MOREIRA, A. *et al.* Avaliação da disponibilidade do fósforo no solo por métodos isotópico, químicos e biológico. **Scientia Agricola**, v. 54, p. 1–2, 1997.

MOREIRA, Fatima Maria De Souza; SIQUEIRA, Jose Oswaldo. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2. ed. [S.l.]: Editora da UFLA, 2006.

- MOUSAVI, Seyed Roohollah *et al.* Cause-effect relationships using structural equation modeling for soil properties in arid and semi-arid regions. **CATENA**, v. 232, p. 107392, 1 nov. 2023.
- MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, p. 31–36, 1962.
- NEVES, Jorge Alexandre Barbosa. Modelo de equações estruturais: uma introdução aplicada. 2018.
- NOVAIS, R. F.; KAMPRATH, E. J. Parametros das isothermas de adsorcao de fosforo como criterio de recomendacao de adubacao fosfatada. Parte de tese. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 3, 1979.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- NOVAIS, Roberto Ferreira; SMYTH, T. Jot; NUNES, Flancer Novais. Fósforo. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa-MG: [S.n.]. p. 471–550.
- NUNES, Ana Paula Pereira; SANTOS, César Ferreira; GUELFÍ, Douglas. Interfaces between biodegradable organic matrices coating and MAP fertilizer for improve use efficiency. **Science of The Total Environment**, v. 804, p. 149896, 15 jan. 2022.
- NUNES, Rafael de Souza *et al.* Distribution of Soil Phosphorus Fractions as a Function of Long-Term Soil Tillage and Phosphate Fertilization Management. **Frontiers in Earth Science**, v. 8, p. 350, 2 set. 2020.
- OLIVEIRA, Lara Caroline Alves De *et al.* Frações de fósforo em função do uso de fertilizantes fosfatados em distintas classes de solo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 4, p. 1–15, 2021.
- OLIVEIRA, Maiara Prates; MALAGOLLI, Guilherme Augusto; CELLA, Daltro. MERCADO DE FERTILIZANTES: dependência de importações do Brasil. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 1, p. 489–498, 2019.
- OLIVEIRA-PAIVA, C. A. *et al.* **Recomendação agrônômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho**. - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1120362/recomendacao-agronomica-de-cepas-de-bacillus-subtilis-cnpms-b2084-e-bacillus-megaterium-cnpms-b119-na-cultura-do-milho>>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- PARFITT, R. L. Anion Adsorption by Soils and Soil Materials. *In*: **Advances in Agronomy**. [S.l.]: Elsevier, 1978. v. 30 p. 1–50.
- PAULY, D. G.; MALHI, S. S.; NYBORG, M. Controlled-release P fertilizer concept evaluation using growth and P uptake of barley from three soils in greenhouse. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 82, n. 2, p. 201–210, 1 maio 2002.
- PAVINATO, Paulo S. *et al.* Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports 2020 10:1**, v. 10, n. 1, p. 1–11, 28 set. 2020.

PAVINATO, Paulo Sérgio. **Dinâmica do fósforo no solo em função do manejo e da presença de resíduos em superfície**. Tese (Doutorado em Agronomia-Agricultura)—Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 2007.

PENN, Chad; CAMBERATO, James. A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. **Agriculture**, v. 9, n. 6, p. 120, 8 jun. 2019.

PEREIRA, Suziane dos Santos. **Modelagem de Equações Estruturais no Software R**, 2013.

PESSOA-DE-SOUZA, Marco Aurélio *et al.* Comportamento químico de Nossolos Quartzarênicos em Mineiros, sudoeste goiano. **Geosciences = Geociências**, v. 34, n. 3, p. 335–347, 24 jul. 2015.

PIERZYNSKI, Gary M.; MCDOWELL, Richard W.; THOMAS SIMS, J. Chemistry, Cycling, and Potential Movement of Inorganic Phosphorus in Soils. *In*: THOMAS SIMS, J.; SHARPLEY, Andrew N. (Orgs.). **Agronomy Monographs**. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 2005. p. 51–86.

PILATI, Ronaldo; LAROS, Jacob Arie. Modelos de equações estruturais em psicologia: conceitos e aplicações. **Psicologia: Teoria e Pesquisa**, v. 23, n. 2, p. 205–216, jun. 2007.

PIZZEGHELLO, Diego *et al.* Bioactivity of Size-Fractionated and Unfractionated Humic Substances From Two Forest Soils and Comparative Effects on N and S Metabolism, Nutrition, and Root Anatomy of *Allium sativum* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1203, 14 ago. 2020.

PROCHNOW, Luíz Ignácio; ALCARDE, José Carlos; CHIEN, Sen Hsuing. Eficiência agrônômica dos fosfatos totalmente acidulados. *In*: YAMADA, Tsuioshi; ABDALLA, Silvia Regina Stipp (Eds.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba-SP: POTAFOS, 2004. p. 605–654.

R CORE TEAM. **R: O Projeto R para Computação Estatística**. ViennaR Foundation for Statistical Computing, , 2021. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 14 ago. 2025

RAFIQUE, Mazhar *et al.* Residual effects of biochar and phosphorus on growth and nutrient accumulation by maize (*Zea mays* L.) amended with microbes in texturally different soils. **Chemosphere**, v. 238, 1 jan. 2020.

RAHMAN, Mohammad A. *et al.* Soil Phosphorus Partition and Transformations Under Diverse Land Uses. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 55, n. 15, p. 2232–2247, 21 ago. 2024.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. [S.l.]: Editora Agronômica Ceres, 1991.

RAIJ, B. van. *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996.

RAIJ, B. van. Fósforo no solo e interação com outros elementos. *In*: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Eds.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato, 2004.

REDEL, Y. *et al.* Assessment of phosphorus status influenced by Al and Fe compounds in volcanic grassland soils. **Journal of soil science and plant nutrition**, n. ahead, p. 0–0, 2016.

REETZ JR, Harold F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. Paris: International Fertilizer industry Association - IFA, 2016.

REVELLE, William. **psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research**. Northwestern University, Evanston, Illinois., 2025. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=psych>>. Acesso em: 26 set. 2025

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Bras. Ci. Solo**, v. 24, p. 589–597, 2000.

RICHARDSON, A. E. Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. **Functional Plant Biology**, v. 28, n. 9, p. 897–906, 2001.

RIVAIE, A. A. *et al.* Effect of phosphate rock and triple superphosphate on soil phosphorus fractions and their plant-availability and downward movement in two volcanic ash soils under *Pinus radiata* plantations in New Zealand. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 82, n. 1, p. 75–88, set. 2008.

RODRIGUES, Marcos *et al.* Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104770, 2020.

ROLIM NETO, F. C. *et al.* Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 953–964, dez. 2004.

ROSSEEL, Yves. lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling. **Journal of Statistical Software**, v. 48, p. 1–36, 24 maio 2012.

ROY, Eric D. *et al.* The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, v. 2, n. 5, p. 16043, 18 abr. 2016.

SAENTHO, Apinya *et al.* Speciation and pH- and particle size-dependent solubility of phosphorus in tropical sandy soils. **Geoderma**, v. 408, p. 115590, fev. 2022.

SALES, Marcus Vinicius da silva. **Modelagem de equações estruturais aplicada ao estudo do ciclo do P em solos tropicais**. Campus Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2015.

SALES, M. V. S. *et al.* Respecification of structural equation models for the P cycle in tropical soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 102, n. 3, p. 347–358, 23 jul. 2015.

SALES, Marcus V. S. *et al.* Structural equation modeling for the estimation of interconnections between the P cycle and soil properties. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 109, n. 2, p. 193–207, 1 nov. 2017.

SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. Reactions of Phosphate Fertilizers in Soils. *In: ASA, CSSA, and SSSA Books*. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1980. p. 263–310.

SANTORO, Veronica; SCHIAVON, Michela; CELI, Luisella. Role of soil abiotic processes on phosphorus availability and plant responses with a focus on strigolactones in tomato plants. **Plant and Soil**, v. 494, n. 1, p. 1–49, 1 jan. 2024.

SANTOS, Danilo Rheinheimer dos; GATIBONI, Luciano Colpo; KAMINSKI, João. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 576–586, abr. 2008.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília-DF: EMBRAPA, 2025.

SANTOS, José Zilton Lopes *et al.* Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 705–714, abr. 2008.

SARKAR, Abhijit *et al.* Polymer coated novel controlled release rock phosphate formulations for improving phosphorus use efficiency by wheat in an Inceptisol. **Soil and Tillage Research**, v. 180, p. 48–62, ago. 2018.

SATO, Shinjiro *et al.* Biogenic calcium phosphate transformation in soils over millennial time scales. **Journal of Soils and Sediments**, v. 9, n. 3, p. 194–205, jun. 2009.

SCHOLZ, Roland W. *et al.* The dynamics of increasing mineral resources and improving resource efficiency: Prospects for mid- and long-term security of phosphorus supply. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 213, p. 107993, 1 fev. 2025.

SCHREIBER, James B. *et al.* Reporting Structural Equation Modeling and Confirmatory Factor Analysis Results: A Review. **The Journal of Educational Research**, v. 99, n. 6, p. 323–338, 1 jul. 2006.

SHEN, Jianbo *et al.* Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997–1005, jul. 2011.

SHEN, Jianbo *et al.* Innovations of phosphorus sustainability: implications for the whole chain. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 6, n. 4, p. 321, 2019.

SHIGAKI, Francirose. **Transporte de fósforo na enxurrada superficial em função do tipo de fonte de P e intensidade das chuvas: Relevância à gerência ambiental em sistemas de produção brasileiros**. Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 1 set. 2006.

SHREVE, Randolph Norris; BRINK, Joseph A. **Indústrias de processos químicos**. 4. ed ed. Rio de Janeiro (RJ): Guanabara, 1997.

SILVA, Erika Caitano da. **Modelagem de equações estruturais no ciclo do fósforo no solo e estratégias de aquisição em solos de diferentes pedogêneses**. Campus Goytacazes-RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2021.

SILVA, Edson Cabral Da *et al.* Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 353–362, 2005.

SILVA, F. C. **Manual De Análises Químicas De Solos, Plantas E Fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

SOUSA, Djalma Martinhão Gomes de; LOBATO, Edson. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília-DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004.

SOUZA, A. E.; FONSECA, D. S. **Fosfato**. Brasília: DNPM, , 2017.

SOUZA FILHO, Luiz Francisco da Silva. **Formas de fósforo em Latossolo sob Cerrado em função do tempo de uso agrícola**. tese de doutorado—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.

SOUZA JÚNIOR, Reginaldo Fidelis De *et al.* Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 159–170, fev. 2012.

SPARKS, Donald L. Environmental Soil Chemistry: An Overview. *In*: SPARKS, Donald L. (Org.). **Environmental Soil Chemistry (Second Edition)**. Burlington: Academic Press, 2003. p. 1–42.

SPOHN, Marie; KUZYAKOV, Yakov. Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 61, p. 69–75, jun. 2013.

STAUFFER E *et al.* **Enhanced efficiency phosphate fertilizers and phosphorus availability in Acrudox**. Disponível em: <<https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.338268665037949>>. Acesso em: 5 jun. 2023.

SUGIHARA, Soh *et al.* Soil phosphorus of stable fraction differentially associate with carbon in the tropical forest and savanna of eastern Cameroon. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 63, n. 6, p. 616–627, 2 nov. 2017.

SYERS, John K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, Denis. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008.

TAKAHASHI, Shigeru; ANWAR, Muhuddin R. Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. **Field Crops Research**, v. 101, n. 2, p. 160–171, mar. 2007.

TANG, Zhi *et al.* Mechanisms and Implications of Phosphate Retention in Soils: Insights from Batch Adsorption Experiments and Geochemical Modeling. **Water**, v. 17, n. 7, p. 998, 28 mar. 2025.

TEIXEIRA, Rafael da Silva *et al.* Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 16, n. 4, p. 1097–1112, 2016.

TIAN, Huixia *et al.* Structural Equation Modeling of Phosphorus Transformations in Soils of *Larix principis-rupprechtii* Mayr. Plantations. **Forests**, v. 14, n. 9, p. 1811, set. 2023.

TIECHER, Tales *et al.* Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 271–282, fev. 2012.

TIECHER, Tales *et al.* Cover Crops Affecting Soil Phosphorus Dynamic in Brazilian Highly Weathered Soils. *In*: REUTER, Jonah (Ed.). **Cover Crops: Cultivation, Management and Benefits**. Hauppauge, New York: Nova Science Publishers Inc, 2016.

TIESSEN, H.; MOIR, J. O. Characterization of Available P by Sequential Extraction. *In*: CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G. (Eds.). **Soil Sampling and Methods of Analysis**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. p. 293–306.

TIESSEN, Holm. Phosphorus Dynamics in Tropical Soils. *In*: THOMAS SIMS, J.; SHARPLEY, Andrew N. (Orgs.). **Agronomy Monographs**. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 2005. p. 253–262.

TOKURA, Alessandra Mayumi *et al.* Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 1, p. 9–16, 2007.

TOKURA, Alessandra Mayumi *et al.* Dinâmica das formas de fósforo em solos de textura e mineralogia contrastantes cultivados com arroz. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 171–179, 2011.

TURNER, Benjamin L.; HAYGARTH, Philip M. Phosphorus solubilization in rewetted soils. **Nature**, v. 411, n. 6835, p. 258, 2001.

VAN KAUWENBERGH, S. J. **World Phosphate Rock Reserves and Resources**. Muscle Shoals: IFDC, 2010.

VIANA, Selma Ferreira *et al.* Variabilidade espacial dos atributos químicos em terra preta de índio cultivada na região de Novo Aripuanã, AM. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 3, p. 53–58, 14 ago. 2016.

VIANA, Tarciana de Oliveira. **Frações de fósforo sob diferentes usos e classes de solo na região sul da Bahia**. Tese de doutorado—CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2016.

VIEIRA, Nilson Darlan. **Resposta da soja a fontes e doses de fósforo em solos com diferentes teores de argila**.

VOGEL, Christian *et al.* Uranium and thorium species in phosphate rock and sewage sludge ash based phosphorus fertilizers. **Journal of Hazardous Materials**, v. 382, p. 121100, jan. 2020.

VOLF, Marcelo R.; ROSOLEM, Ciro A. Soil P Diffusion and Availability Modified by Controlled-Release P Fertilizers. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 1, p. 162–172, 1 mar. 2021.

WALKER, T. W.; SYERS, J. K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, v. 15, n. 1, p. 1–19, 1976.

WANG, Yuan *et al.* Soil phosphorus availability and fractionation in response to different phosphorus sources in alkaline and acid soils: a short-term incubation study. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 5677, 7 abr. 2023.

WEIL, Ray R.; BRADY, Nyle C. **The nature and properties of soils**. Fifteenth edition, global edition ed. Harlow, England London New York: Pearson, 2017.

WITHERS, Paul J. A. *et al.* Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 2537, 7 fev. 2018.

WRIGHT, Sewall. The Method of Path Coefficients. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 5, n. 3, p. 161–215, 1934.

WU, Ping *et al.* A scientometric review of biochar research in the past 20 years (1998–2018). **Biochar** **2019** **1:1**, v. 1, n. 1, p. 23–43, 27 mar. 2019.

YI, Chenxu *et al.* Speciation of Iron and Aluminum in Relation to Phosphorus Sorption and Supply Characteristics of Soil Aggregates in Subtropical Forests. **Forests**, v. 14, n. 9, p. 1804, 4 set. 2023.

ZAMUNER, E. C.; PICONE, L. I.; ECHEVERRIA, H. E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. **Soil and Tillage Research**, v. 99, n. 2, p. 131–138, 2008.

ZAPATA, F.; ROY, R. N. **Use of phosphate rocks for sustainable agriculture**. Rome: FAO, 2004.

ZHANG, Hongzhi; SHI, Leilei; FU, Shenglei. Effects of nitrogen deposition and increased precipitation on soil phosphorus dynamics in a temperate forest. **Geoderma**, v. 380, p. 114650, 2020.

ZHANG, Shugang *et al.* Biowaste-derived, nanohybrid-reinforced double-function slow-release fertilizer with metal-adsorptive function. **Chemical Engineering Journal**, v. 450, p. 138084, 2022.

ZHAO, Wenfei *et al.* Novel Weighting Method for Evaluating Forest Soil Fertility Index: A Structural Equation Model. **Plants**, v. 12, n. 2, p. 410, 15 jan. 2023.

ZHU, Jing; LI, Min; WHELAN, Mick. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. **Science of The Total Environment**, v. 612, p. 522–537, 15 jan. 2018.

## 4. CAPÍTULO II

### Estabilização das frações de Fósforo em Nitossolo Vermelho eutrófico: Efeitos de Fontes Solúveis e Aditivos

#### **Resumo:**

A baixa disponibilidade de fósforo (P) em solos tropicais está associada à elevada adsorção e precipitação do nutriente em formas pouco acessíveis. Neste estudo, foi avaliada a dinâmica das frações de P em um Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe) submetido à aplicação de fertilizantes fosfatados e aditivos. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial  $2 \times 3 + 1$ , com duas fontes de P – monoamônio fosfato (MAP) e superfosfato triplo (ST) – associadas ou não aos aditivos KimcoatBioHP® e IFCoat, além de um tratamento controle. Foi realizado o fracionamento de P, abrangendo formas inorgânicas e orgânicas, em coletas aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação. Nos primeiros 90 a 180 dias, período correspondente ao ciclo de culturas anuais, observou-se maior participação das frações lábeis e da biomassa microbiana (Po-mic), que atuou como reservatório transitório, equilibrando a disponibilidade de P no solo. O MAP associado ao aditivo KimcoatBioHP® manteve os maiores teores de Pi-Lábil e Pi-solução, reduzindo perdas por fixação e prolongando a liberação do nutriente. O ST associado ao IFCoat também favoreceu o acúmulo de P lábil no período intermediário, sustentando níveis adequados de disponibilidade até 270 dias. Em longo prazo, contudo, verificou-se a transferência gradual do P para frações menos disponíveis, como Pi-Fe+Al e Pi-ocluso. De forma geral, os resultados indicam que o manejo mais eficiente do P no NVe envolve o uso de MAP com KimcoatBioHP® para maximizar a disponibilidade durante o ciclo das culturas de curta duração, ou ST com IFCoat para prolongar a liberação do nutriente, conciliando a ciclagem biológica com a redução das perdas por fixação.

**Palavras-chave:** solos tropicais; fertilizantes fosfatados; disponibilidade de P; tecnologias para fertilizantes; fixação de P; eficiência de uso de P.

#### **Abstract:**

The low phosphorus (P) availability in tropical soils is mainly attributed to the strong adsorption and precipitation of the nutrient into forms that are poorly available to plants. This study evaluated the dynamics of P fractions in a Typic Eutrophic Red Nitisol (NVe) subjected to the application of phosphate fertilizers and controlled-release additives. The experiment was arranged in a randomized block design, in a  $2 \times 3 + 1$  factorial scheme, with two P sources – monoammonium phosphate (MAP) and triple superphosphate (ST)

– applied with or without the additives KimcoatBioHP<sup>®</sup> and IFCoat, in addition to an unfertilized control. Phosphorus fractionation was carried out at 30, 90, 180, 270, and 360 days after incubation, encompassing both inorganic and organic forms. During the first 90 to 180 days, corresponding to the typical growth cycle of annual crops, there was a predominance of labile fractions and microbial biomass P (Po-mic), which acted as a transient reservoir regulating P availability in soil. MAP combined with KimcoatBioHP<sup>®</sup> maintained higher levels of Pi-labile and Pi-solution, reducing fixation losses and prolonging nutrient release. The ST combined with IFCoat also enhanced the accumulation of labile P during the intermediate phase, sustaining adequate availability up to 270 days. In the long term, however, P was progressively transferred to less available fractions, such as Pi-Fe+Al and Pi-occluded. Overall, the most efficient P management strategy for NVe soils involves the use of MAP with KimcoatBioHP<sup>®</sup> to maximize P availability during short-cycle crops, or ST with IFCoat to extend nutrient release, balancing biological cycling with reduced fixation losses.

**Keywords:** tropical soils; phosphate fertilizers; P availability; fertilizer technologies; P fixation; phosphorus use efficiency.

#### 4.1 Introdução

Os Nitossolos Vermelhos eutróficos (NVe) constituem uma das classes de solos mais expressivas em áreas agrícolas do Brasil, ocupando extensas regiões tropicais e subtropicais. São solos profundos, bem estruturados, com alta fertilidade natural e elevado teor de argilas de atividade moderada a alta, conferindo elevada capacidade de retenção de água e nutrientes (Santos *et al.*, 2018). Essas características tornam os NVe amplamente utilizados em sistemas agrícolas intensivos, sustentando cultivos de grande importância econômica.

Apesar da fertilidade relativamente elevada, a dinâmica do fósforo (P) nesses solos ainda representa um desafio ao manejo. Isso porque, mesmo em ambientes eutróficos, a interação do P com argilas de alta atividade e com os óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) presentes no perfil resulta em processos de adsorção específica e precipitação, reduzindo a disponibilidade para as plantas (Ichinose *et al.*, 2025; Novais; Smyth, 1999; Pierzynski; McDowell; Thomas Sims, 2005; Tang *et al.*, 2025). O P adicionado via fertilização tende a ser rapidamente imobilizado em formas inorgânicas pouco lábeis, como precipitação com Fe e Al e a oclusão, limitando a eficiência agrônômica dos fertilizantes solúveis.

Além das formas inorgânicas, as frações orgânicas de P desempenham papel relevante no suprimento do nutriente ao longo do tempo, atuando como reservatórios que dependem da atividade microbiana e dos processos de mineralização (Condon; Tiessen, 2005; Fox *et al.*, 2011; McLaren *et al.*, 2017). O fósforo da biomassa microbiana, em

particular, constitui uma fração dinâmica e sensível às mudanças de manejo, funcionando como elo entre a ciclagem biológica e a disponibilidade imediata do nutriente (Bai *et al.*, 2020; Bünemann *et al.*, 2012; Rafique *et al.*, 2020; Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000). Dessa forma, a compreensão da interação entre as frações orgânicas e inorgânicas é fundamental para explicar a eficiência do uso de P em sistemas agrícolas sob NVe.

Nesse contexto, fertilizantes fosfatados solúveis, como o monoamônio fosfato (MAP) e o superfosfato triplo (ST), apresentam comportamentos distintos em NVe. O MAP, por sua elevada solubilidade, fornece rapidamente P à solução do solo, mas também está sujeito a fixação acelerada por óxidos e hidróxidos de Fe e Al. O ST, por sua vez, libera P de maneira mais gradual e contém cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) na formulação, e pode modificar a dinâmica de precipitação e a formação de fosfatos de cálcio pouco solúveis (Alcarde, 2007; Sample; Soper; Racz, 1980; Sato *et al.*, 2009; Shen *et al.*, 2011).

A adição de aditivos, como revestimentos poliméricos (KimcoatBioHP<sup>®</sup> e IFCoat<sup>®</sup>), tem sido estudada como estratégia para prolongar a disponibilidade do P no solo, reduzindo a velocidade de fixação em compartimentos estáveis (Guelfi *et al.*, 2022; Hawkins *et al.*, 2022). Embora promissores, os efeitos desses aditivos variam conforme as propriedades do solo e a interação com a matéria orgânica, a microbiota e os minerais de Fe e Al. No caso dos NVe, ainda são escassos estudos que explorem de forma detalhada como os revestimentos modulam a dinâmica das diferentes frações de P ao longo do tempo.

Diante disso, este capítulo tem como objetivo avaliar os efeitos da aplicação de fontes de fertilizantes fosfatados, isoladas ou combinadas a aditivos, sobre a dinâmica das frações de fósforo em um Nitossolo Vermelho eutrófico ao longo de 360 dias de incubação. A análise abrange tanto as frações inorgânicas quanto as orgânicas, permitindo compreender os processos de transformação, imobilização e estabilização do P nesse tipo de solo e fornecendo subsídios para práticas de manejo mais eficientes e sustentáveis em ambientes tropicais de alta fertilidade natural.

#### 4.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação nas dependências do IF Goiano – Campus Rio Verde (GO), durante 360 dias. Utilizou-se um Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe) (Santos *et al.*, 2025), com amostras coletadas na profundidade correspondente ao horizonte diagnóstico Bt<sub>2</sub> (0,52–0,80 m). A caracterização granulométrica e mineralógica é apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Caracterização granulométrica e mineralógica dos horizontes superficiais do Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe)<sup>1</sup>.

Características		
Solo	-	NVe
Cidade/Estado	-	Caçu/GO
Coordenadas	-	18°28'36" S 51°08'12" W
Horizonte	-	Bt2
Profundidade	m	0,52 a 0,80
Areia	g kg <sup>-1</sup>	243
Silte	g kg <sup>-1</sup>	95
Argila	g kg <sup>-1</sup>	664
SiO <sub>2</sub>	g kg <sup>-1</sup>	178
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	g kg <sup>-1</sup>	203
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	g kg <sup>-1</sup>	255
Ki <sup>*</sup>	-	1,49
Kr <sup>**</sup>	-	0,83
$\frac{Al_2O_3^{***}}{Fe_2O_3}$		1,25
Mineralogia da fração Argila <sup>2</sup>	-	Ct, Gb, Hm e indícios de Ve

<sup>1</sup>(Santos *et al.*, 2018); \*Ki = %SiO<sub>2</sub>x<sup>1,7</sup>/ %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; \*\*Kr = [(%SiO<sub>2</sub> x 1,7)/ %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>] + (%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> x 0,64);

\*\*\* $\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} = Al_2O_3 \times 1,57 / Fe_2O_3$  e <sup>2</sup>Difratometria de Raio X; Ct = Caulinita; Gb = Gibbsita; Hm = Hematita; Ve = Vermiculita.

Foram retiradas subamostras para a caracterização química pH-H<sub>2</sub>O, pH-KCl, pH-CaCl<sub>2</sub>, P (Mehlich I), P-remanescente (P-rem), K trocável (Mehlich I), Ca, Mg Al trocáveis (KCl), H+Al (Acetato de Cálcio) e matéria orgânica (MO) (Silva, 2009). Com base nos resultados foram estimados os valores de ΔpH, CTC potencial (T), saturação de bases (V) e alumínio (m) (Tabela 2).

Por causa da alta saturação de Ca na CTC observada nesse solo, não foi necessária a aplicação de corretivo. Para padronização entre os experimentos conduzidos com os demais solos que compõe os capítulos I e III, esse teor foi utilizado como referência para o cálculo da saturação de cálcio (55,21%) empregada nos outros ensaios. O solo do NVe foi apenas homogeneizado e mantido sob umidade controlada por 30 dias antes da aplicação dos tratamentos, garantindo a estabilização da microbiota e das reações de equilíbrio químico.

**Tabela 2.** Caracterização química das subamostras dos solos Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe).

<b>Características</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
<b>pH H<sub>2</sub>O</b>	-	5,15
<b>pH CaCl<sub>2</sub></b>	-	4,69
<b>pH KCl</b>	-	4,45
<b>ΔpH</b>	-	-0,70
<b>P – M1</b>	mg dm <sup>-3</sup>	2,38
<b>P-rem</b>	mg dm <sup>-3</sup>	41,90
<b>Pi<sup>1</sup>-solução</b>	mg dm <sup>-3</sup>	2,76
<b>Pi-Lábil</b>	mg dm <sup>-3</sup>	4,09
<b>Po<sup>2</sup>-Lábil</b>	mg dm <sup>-3</sup>	180,88
<b>Po-microbiano</b>	mg dm <sup>-3</sup>	14,23
<b>Pi-Não Lábil</b>	mg dm <sup>-3</sup>	94,60
<b>Po-Não Lábil</b>	mg dm <sup>-3</sup>	0,00
<b>Pi-Fe+Al</b>	mg dm <sup>-3</sup>	7,12
<b>Po-Recalcitrante</b>	mg dm <sup>-3</sup>	3,85
<b>Pi-Ca</b>	mg dm <sup>-3</sup>	1,69
<b>K</b>	mg dm <sup>-3</sup>	130,00
<b>Ca</b>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	5,67
<b>Mg</b>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	2,33
<b>Al</b>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,11
<b>H+Al</b>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	1,94
<b>Soma de Bases (SB)</b>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	8,33
<b>CTC pH 7,0 (T)</b>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	10,27
<b>Saturação de Bases (V)</b>	%	81,1
<b>Saturação de alumínio (m)</b>	%	1,3
<b>Matéria Orgânica do Solo (M.O.)</b>	g dm <sup>-3</sup>	45,3

<sup>1</sup>Pi – Fósforo na fração inorgânica; <sup>2</sup>Po – fósforo na fração orgânica do solo.

#### 4.2.1 Determinação da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)

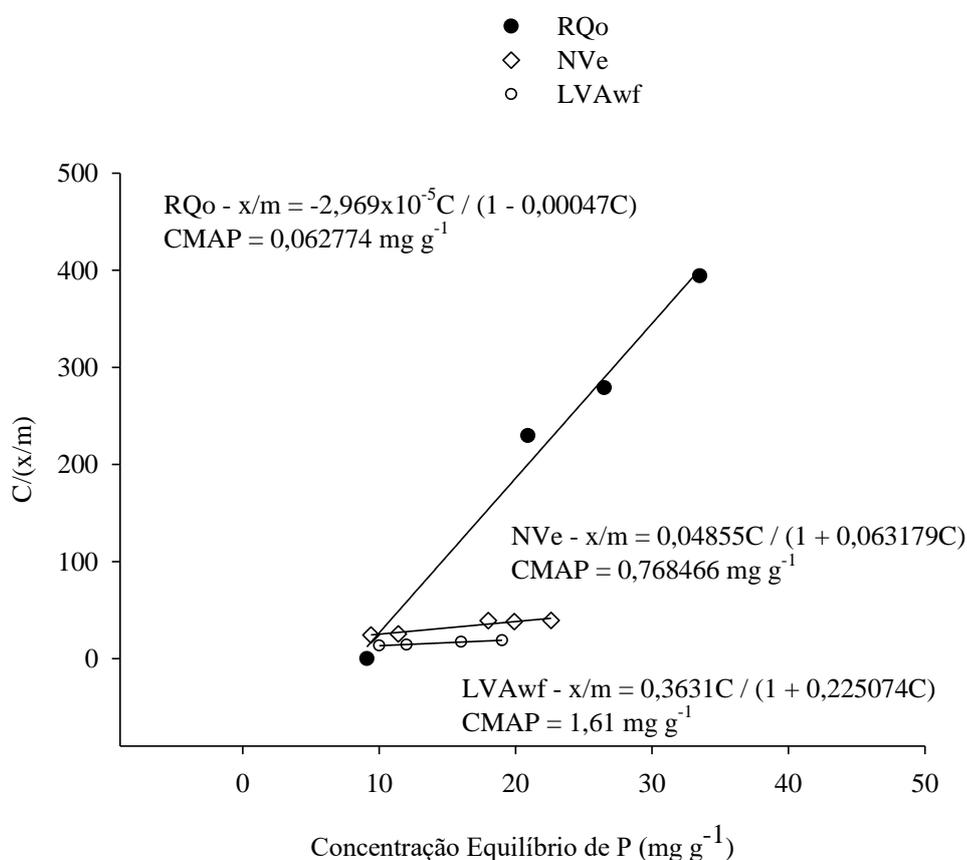
Após a calagem, foram coletadas subamostras para a estimativa da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP), segundo metodologia descrita por Fonseca *et al.* (1988) e Alvarez *et al.* (2000). Foram utilizados 2,5 cm<sup>3</sup> de terra fina seca ao ar (TFSA) de cada repetição, em pH natural, dispersos em 25 mL de solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> contendo fósforo (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) nas concentrações de 0, 2, 4, 10, 20, 40, 60, 80, 100 e 120 mg L<sup>-1</sup> de P. As suspensões foram agitadas horizontalmente por 24 horas em temperatura ambiente, centrifugadas a 4 000 g por 10 minutos, e o fósforo remanescente na solução foi determinado pelo método colorimétrico do ácido ascórbico (Murphy; Riley, 1962).

A quantidade de fósforo adsorvido (q, mg g<sup>-1</sup> de solo) foi obtida pela diferença entre o P adicionado e o P remanescente na solução de equilíbrio. Os dados foram ajustados à isoterma de Langmuir (1918), na forma linearizada:

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{ab} + \frac{C}{b}$$

em que C é a concentração de P em equilíbrio ( $\text{mg L}^{-1}$ ), a é a constante relacionada à energia de ligação e b é a capacidade máxima de adsorção (CMAP).

O valor de CMAP para o NVe foi de  $0,768 \text{ mg g}^{-1}$ , indicando capacidade intermediária de adsorção, coerente com o teor de argila e presença de óxidos de Fe e Al (Figura 1). Os parâmetros a e b foram obtidos por regressão linear entre  $C/q$  e C, e os resultados expressos em  $\text{mg g}^{-1}$  de P adsorvido.



**Figura 1.** Representação gráfica da forma linear da isoterma de Langmuir, das equações hiperbólicas e dos valores estimados da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP,  $\text{mg P g}^{-1}$  de solo) para o Neossolo Quartzarênico Órtico típico (RQo), Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe) e Latossolo Vermelho-Amarelo acriférrico (LVAwf).

As doses de P aplicadas nos experimentos foram estimadas conforme a metodologia proposta por Alvarez V. & Fonseca (1990), que estabelece critérios para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e definição de doses em ensaios de casa de vegetação. Para o Nitossolo Vermelho Eutrófico típico (NVe), a dose

de P utilizada foi de  $250 \text{ mg dm}^{-3}$ , correspondente à capacidade intermediária de adsorção desse solo.

As quantidades de fertilizante foram ajustadas com base nos teores de P das fontes, de modo a garantir equivalência no aporte de fósforo e permitir a comparação entre as fontes e os aditivos avaliados. O monoamônio fosfato (MAP) contém 51% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (22,3% de P) e 11% de  $\text{N-NH}_4^+$ , enquanto o superfosfato triplo (ST) apresenta 46% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (20,1% de P) e 10% de Ca. Assim, para atingir a dose de  $250 \text{ mg dm}^{-3}$  de P, foram aplicados aproximadamente  $1,12 \text{ g kg}^{-1}$  de MAP e  $1,24 \text{ g kg}^{-1}$  de ST.

#### 4.2.2 Delineamento experimental e manejo

O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso, em esquema fatorial  $2 \times 3 + 1$ , composto por duas fontes de fósforo (MAP e ST), três condições de aditivos (sem aditivo, KimcoatBioHP<sup>®</sup> e IFCoat) e um tratamento controle (sem aplicação de P e aditivos), com quatro repetições.

O KimcoatBioHP<sup>®</sup> é um revestimento polimérico composto por 50%  $\text{CaCO}_3$ , 16% Ca, além de polímeros e substâncias húmicas, enquanto o IFCoat, é um aditivo teste, consiste em polímero de liberação controlada desenvolvido para retardar a solubilização do fertilizante e reduzir as perdas por fixação.

As unidades experimentais foram compostas por vasos de polietileno de  $3 \text{ dm}^3$ , contendo  $1,5 \text{ kg}$  de solo seco ao ar. A temperatura foi mantida perto de  $30^\circ\text{C}$ , e a umidade do solo foi controlada por pesagem dos vasos para reposição da água evapotranspirada.

Durante os primeiros 180 dias, a pesagem e reposição de água foram realizadas diariamente, mantendo o teor de umidade próximo a 60% do volume de poros preenchidos com água. Nos 180 dias seguintes, o controle foi feito a cada 30 dias, simulando ciclos de umedecimento e secagem equivalentes a um ciclo agrícola anual.

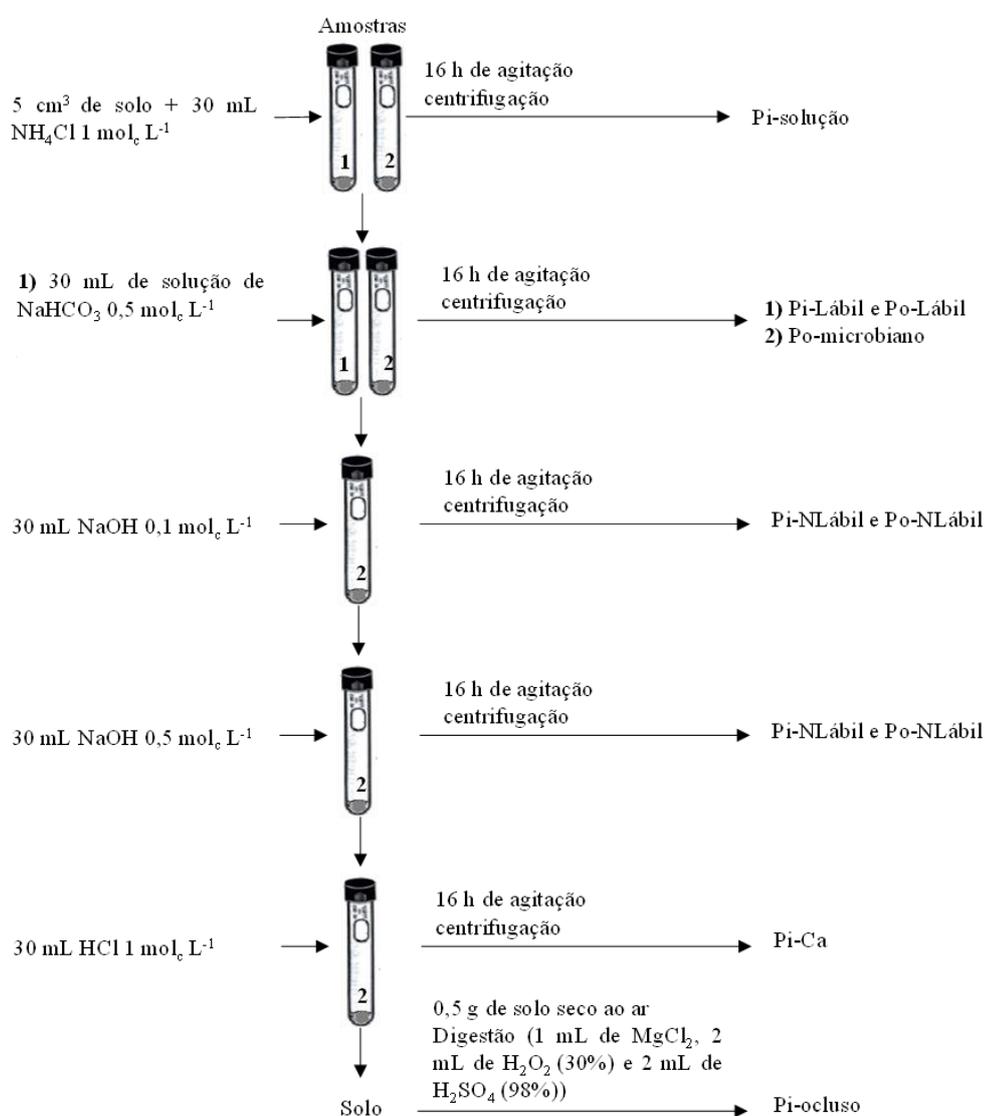
#### 4.2.3 Amostragem e fracionamento do fósforo

As amostras de solo foram obtidas após a homogeneização do solo de cada unidade experimental, aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após a instalação do experimento (DAI). Posteriormente, foram secas ao ar, peneiradas ( $< 2 \text{ mm}$ ) e acondicionadas em sacos devidamente identificados. Para o fracionamento do fósforo, utilizaram  $10 \text{ g}$  de solo, na proporção de 1:3 (solo:solução extratora).

O fósforo em solução (Pi-solução) foi determinado por extração com cloreto de amônio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )  $1 \text{ mol L}^{-1}$  (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013), e as demais frações

foram obtidas segundo o método sequencial de Hedley (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982) (Figura 2). Após cada extração, adicionaram 25 mL de NaCl 1 mol L<sup>-1</sup>, seguidos de agitação a 200 rpm por 5 minutos e centrifugação a 4 000 g por 5 minutos, descartando o sobrenadante para reduzir interferência de Ca e evitar superestimação das frações orgânicas lábil (Po-Lábil) e a pouco a moderadamente lábil (Po-NLábil).

A superestimação das frações Po-Lábil e Po-NLábil ocorre pela precipitação de Ca com o ânion fosfato em meio acidificado pela adição do ácido sulfúrico utilizado para precipitar os compostos orgânicos obtidos na extração com bicarbonato de sódio (NaHCO<sub>3</sub>) e hidróxido de sódio (NaOH) a 0,5 e 1 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013).



**Figura 2.** Esquema do fracionamento do fósforo no solo de acordo com o método (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982) com modificações e correlação das frações com as formas do fósforo no solo (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013). Fonte: Adaptado de (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013).

As frações inorgânicas do P no solo foram classificadas em: P extraído pelo  $\text{NH}_4\text{Cl}$  1 mol  $\text{L}^{-1}$  como P em solução (Pi-solução); P extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  em P inorgânico lábil (Pi-Lábil); P extraído pelo  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  equivalente ao P inorgânico precipitado com Fe e Al na solução do solo (Pi Fe+Al) (Costa *et al.*, 2016; Cross; Schlesinger, 1995; Klotzbücher *et al.*, 2019; Luo; Yuan; Huang, 2024; Mirabello *et al.*, 2013; Redel *et al.*, 2016); P extraído pelo  $\text{NaOH}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  equivalente ao P inorgânico não lábil (Pi-NLábil); P extraído pelo  $\text{HCl}$  1 mol  $\text{L}^{-1}$  em P inorgânico precipitado com Ca de diferentes espécies iônicas (Pi-Ca) e o P extraído por digestão sulfúrica,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 65% (1:1 v/v solo : solução extratora) em P inorgânico ocluso e pequenas frações de P precipitado com Ca não extraídos pelo  $\text{HCl}$  (Pi-occluso).

As frações orgânicas foram classificadas em: P orgânico microbiano, que equivale ao P na biomassa microbiana viva, extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  + clorofórmio ( $\text{CHCl}_3$ ) em P orgânico microbiano (Po-mic); P extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  em P orgânico lábil (Po-Lábil); P orgânico extraído pelo  $\text{NaOH}$  a 0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  em P orgânico moderadamente lábil (Po-MLábil) e P orgânico extraído pelo  $\text{NaOH}$  a 0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  em P orgânico não lábil (Po-NLábil).

#### 4.2.4 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste de média (Scott Knott 5% de prob.). Quando ajustados modelos matemáticos para as respostas dos tratamentos, foi realizada a análise de identidade dos modelos para cada variável. As análises estatísticas foram realizadas no R (R Core Team, 2021) utilizando os pacotes ExpDes.pt (Ferreira; Cavalcanti; Nogueira, 2021) e FactoMineR (Lê; Josse; Husson, 2008). Além disso, foi realizada uma análise de correlação de *Pearson* ( $r$ ) entre as frações de P ( $p < 0,01$  e  $0,05$ ).

#### 4.3 Resultado e Discussão

Após aplicação, fertilizantes solúveis podem ser absorvidos pelas plantas e microrganismos, fixados por constituintes do solo ou ainda liberados para o ambiente (Alcarde, 2007; Aziz *et al.*, 2014; Novais; Smyth, 1999; Rafique *et al.*, 2020). Aos 30 dias após incubação (30 DAI) em um Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe), a concentração de fósforo inorgânico em solução (Pi-solução) apresentou pouco responsiva aos tratamentos com fertilizantes e aditivos (Tabela 3). Contudo, nesse período inicial, observou-se

diferença entre o tratamento fatorial e o tratamento controle (Figura 3A), evidenciando um aporte inicial de P solúvel proveniente da aplicação dos fertilizantes.

Após a solubilização dos fertilizantes, a reação do fosfato monovalente ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) com outros íons depende da concentração e atividade destes, podendo resultar na conversão para Pi-lábil em poucas horas ou dias (Novais; Smyth, 1999). Aos 30 DAI, o fósforo inorgânico lábil (Pi-lábil) foi significativamente alterado pela aplicação dos fertilizantes fosfatados, com diferença evidente entre o tratamento controle e o tratamento fatorial (Figura 3B) (Tabela 3).

**Tabela 3.** Análise de variância das frações de P no Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI).

Fontes de Variação	Fertilizantes (F)	Aditivo (A)	F vs. A	Adicional vs. Fatorial	CV(%)	Média ± erro
<b>30 DAI</b>						
Pi-solução	1,64 <sup>ns</sup>	0,92 <sup>ns</sup>	0,69 <sup>ns</sup>	4,38*	39,46	0,57 ± 0,04
Pi-Lábil	14,71**	0,45 <sup>ns</sup>	1,10 <sup>ns</sup>	10,35**	56,41	2,95 ± 0,42
Pi-NLábil	46,18**	2,67 <sup>ns</sup>	2,90 <sup>ns</sup>	7,76*	37,83	67,05 ± 8,56
Pi-ocluso	4,97*	2,20 <sup>ns</sup>	0,86 <sup>ns</sup>	0,86 <sup>ns</sup>	10,95	1199,58 ± 27,41
Pi-Fe+Al	19,37**	9,00**	0,33 <sup>ns</sup>	9,70**	43,37	18,82 ± 2,46
Pi-Ca	3,20 <sup>ns</sup>	1,72 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	1,88 <sup>ns</sup>	87,51	2,07 ± 0,36
Po-Lábil	0,06 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	1,83 <sup>ns</sup>	4,38*	44,76	1,65 ± 0,14
Po-mic	79,13**	11,67**	37,30**	43,67**	32,69	1,52 ± 0,28
Po-MLábil	0,90 <sup>ns</sup>	29,20**	13,32**	59,96**	26,88	9,98 ± 1,26
Po-NLábil	0,53 <sup>ns</sup>	0,86 <sup>ns</sup>	0,51 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	51,67	61,07 ± 5,66
<b>90 DAI</b>						
Pi-sol	1,15 <sup>ns</sup>	2,46 <sup>ns</sup>	0,63 <sup>ns</sup>	3,39 <sup>ns</sup>	11,75	0,70 ± 0,02
Pi-Lábil	0,02 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	2,90 <sup>ns</sup>	0,98 <sup>ns</sup>	23,37	3,73 ± 0,16
Pi-NLábil	0,65 <sup>ns</sup>	18,83**	2,98 <sup>ns</sup>	18,10**	19,85	68,72 ± 4,52
Pi-ocluso	3,50 <sup>ns</sup>	0,61 <sup>ns</sup>	3,52*	3,65 <sup>ns</sup>	5,40	266,10 ± 3,15
Pi-Fe+Al	2,18 <sup>ns</sup>	2,32 <sup>ns</sup>	49,61**	47,13**	17,22	10,40 ± 0,86
Pi-Ca	8,43**	0,08 <sup>ns</sup>	14,08**	4,33*	29,44	9,68 ± 0,82
Po-Lábil	79,41**	42,34**	34,87**	18,82**	20,64	3,32 ± 0,41
Po-mic	2,47 <sup>ns</sup>	7,34**	1,54 <sup>ns</sup>	32,01**	28,71	25,32 ± 2,26
Po-MLábil	10,57**	4,93*	13,71**	14,39**	34,14	8,21 ± 0,93
Po-NLábil	0,54 <sup>ns</sup>	10,15**	19,76**	27,13**	25,08	76,48 ± 7,27
<b>180 DAI</b>						
Pi-sol	16,82**	1,72 <sup>ns</sup>	2,18 <sup>ns</sup>	1,24 <sup>ns</sup>	15,41	0,52 ± 0,02
Pi-Lábil	12,47**	5,57*	11,52**	17,46**	38,34	3,15 ± 0,40
Pi-NLábil	8,04**	0,08 <sup>ns</sup>	1,93 <sup>ns</sup>	3,68 <sup>ns</sup>	14,82	28,87 ± 0,94
Pi-ocluso	13,58**	19,58**	1,96 <sup>ns</sup>	6,22*	8,68	464,64 ± 13,43
Pi-Fe+Al	6,52*	0,70 <sup>ns</sup>	0,48 <sup>ns</sup>	20,45**	31,19	54,42 ± 4,38
Pi-Ca	5,30*	7,48**	0,73 <sup>ns</sup>	6,92*	44,37	0,49 ± 0,05

Fontes de Variação	Fertilizantes (F)	Aditivo (A)	F vs. A	Adicional vs. Fatorial	CV(%)	Média ± erro
<b>Continuação 180 DAI</b>						
<b>Po-Lábil</b>	17,40**	15,78**	0,43 <sup>ns</sup>	628,37**	11,11	8,94 ± 0,95
<b>Po-mic</b>	13,62**	0,57 <sup>ns</sup>	6,36**	12,76**	60,48	1,91 ± 0,33
<b>Po-MLábil</b>	22,36**	22,36**	22,36**	1479,92**	25,42	7,22 ± 2,68
<b>Po-NLábil</b>	15,07**	0,21 <sup>ns</sup>	7,00**	32,15**	18,75	141,65 ± 8,78
<b>270 DAI</b>						
<b>Pi-sol</b>	1,37 <sup>ns</sup>	5,41*	1,20 <sup>ns</sup>	4,57*	21,13	1,08 ± 0,05
<b>Pi-Lábil</b>	1,53 <sup>ns</sup>	9,02**	7,39**	43,27**	20,14	2,89 ± 0,21
<b>Pi-NLábil</b>	0,01 <sup>ns</sup>	0,88 <sup>ns</sup>	1,71 <sup>ns</sup>	14,13**	31,46	80,60 ± 5,86
<b>Pi-ocluso</b>	0,00 <sup>ns</sup>	1,60 <sup>ns</sup>	0,56 <sup>ns</sup>	1,80 <sup>ns</sup>	10,99	211,46 ± 4,40
<b>Pi-Fe+Al</b>	0,02 <sup>ns</sup>	5,70*	13,53**	28,51**	33,30	19,58 ± 2,22
<b>Pi-Ca</b>	0,03 <sup>ns</sup>	1,80 <sup>ns</sup>	0,97 <sup>ns</sup>	6,49*	47,29	2,13 ± 0,21
<b>Po-Lábil</b>	0,09 <sup>ns</sup>	1,11 <sup>ns</sup>	2,21 <sup>ns</sup>	12,00**	13,62	5,18 ± 0,16
<b>Po-mic</b>	1,88 <sup>ns</sup>	11,61**	3,09 <sup>ns</sup>	16,34**	53,44	3,34 ± 0,54
<b>Po-MLábil</b>	3,72 <sup>ns</sup>	6,76**	13,82**	17,72**	27,64	46,81 ± 430
<b>Po-NLábil</b>	39,79**	0,39 <sup>ns</sup>	6,71**	0,16 <sup>ns</sup>	49,28	18,40 ± 2,86
<b>360 DAI</b>						
<b>Pi-sol</b>	6,73*	11,72**	15,28**	19,87**	20,29	0,80 ± 0,06
<b>Pi-Lábil</b>	4,55*	16,87**	40,33**	37,07**	31,50	6,50 ± 0,99
<b>Pi-NLábil</b>	1,20 <sup>ns</sup>	1,42 <sup>ns</sup>	24,56**	56,25**	15,88	95,30 ± 6,28
<b>Pi-ocluso</b>	3,33 <sup>ns</sup>	9,63**	0,29 <sup>ns</sup>	5,04*	6,15	1579,21 ± 24,78
<b>Pi-Fe+Al</b>	4,05 <sup>ns</sup>	1,94 <sup>ns</sup>	0,36 <sup>ns</sup>	11,10**	27,62	21,04 ± 1,35
<b>Pi-Ca</b>	0,03 <sup>ns</sup>	6,18**	0,25 <sup>ns</sup>	8,77**	42,29	1,56 ± 0,16
<b>Po-Lábil</b>	5,06*	46,73**	103,19**	0,21 <sup>ns</sup>	20,03	4,12 ± 0,54
<b>Po-mic</b>	9,91**	9,91**	9,91**	34,41**	91,32	0,16 ± 0,05
<b>Po-MLábil</b>	0,56 <sup>ns</sup>	10,21**	2,48 <sup>ns</sup>	177,20**	40,98	9,82 ± 2,19
<b>Po-NLábil</b>	1,17 <sup>ns</sup>	1,17 <sup>ns</sup>	1,17 <sup>ns</sup>	1,17 <sup>ns</sup>	529,15	0,17 ± 0,17

<sup>ns</sup>, \*\*, \* = não significativo, significativo a 1% e 5%; Pi-solução = P inorgânico em solução (P<sub>NH4Cl-1,0</sub>); Pi-Lábil = P inorgânico lábil (P<sub>BIC</sub>); Pi-NLábil P inorgânico não lábil (P<sub>HID-0,5</sub>); Pi.ocluso = P inorgânico ocluso ou P residual (P<sub>H2SO4+H2O2</sub>); Pi-Fe+Al P inorgânico precipitado com Fe e Al (P<sub>HID1,0</sub>); P inorgânico precipitado com cálcio (P<sub>HCl1,0</sub>); Po-Lábil = P orgânico lábil (P<sub>BIC</sub>); Po-mic = P na biomassa microbiana viva (P<sub>BIC+CHCl3</sub>); Po.MLábil = P orgânico moderadamente lábil (P<sub>HID-0,1</sub>); Po-NLábil = P orgânico não lábil (P<sub>HID-0,5</sub>); Fertilizantes (F) = MAP (fosfato monoamônio – NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) e ST (superfosfato triplo (Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); Aditivos (A) = KimcoatBioHP®, IFCoat e sem aditivos; F vs. A = interação; Adicional vs. Fatorial = interação; CV (%) = coeficiente de variação; Média ± erro = média e erro do tratamento fatorial.

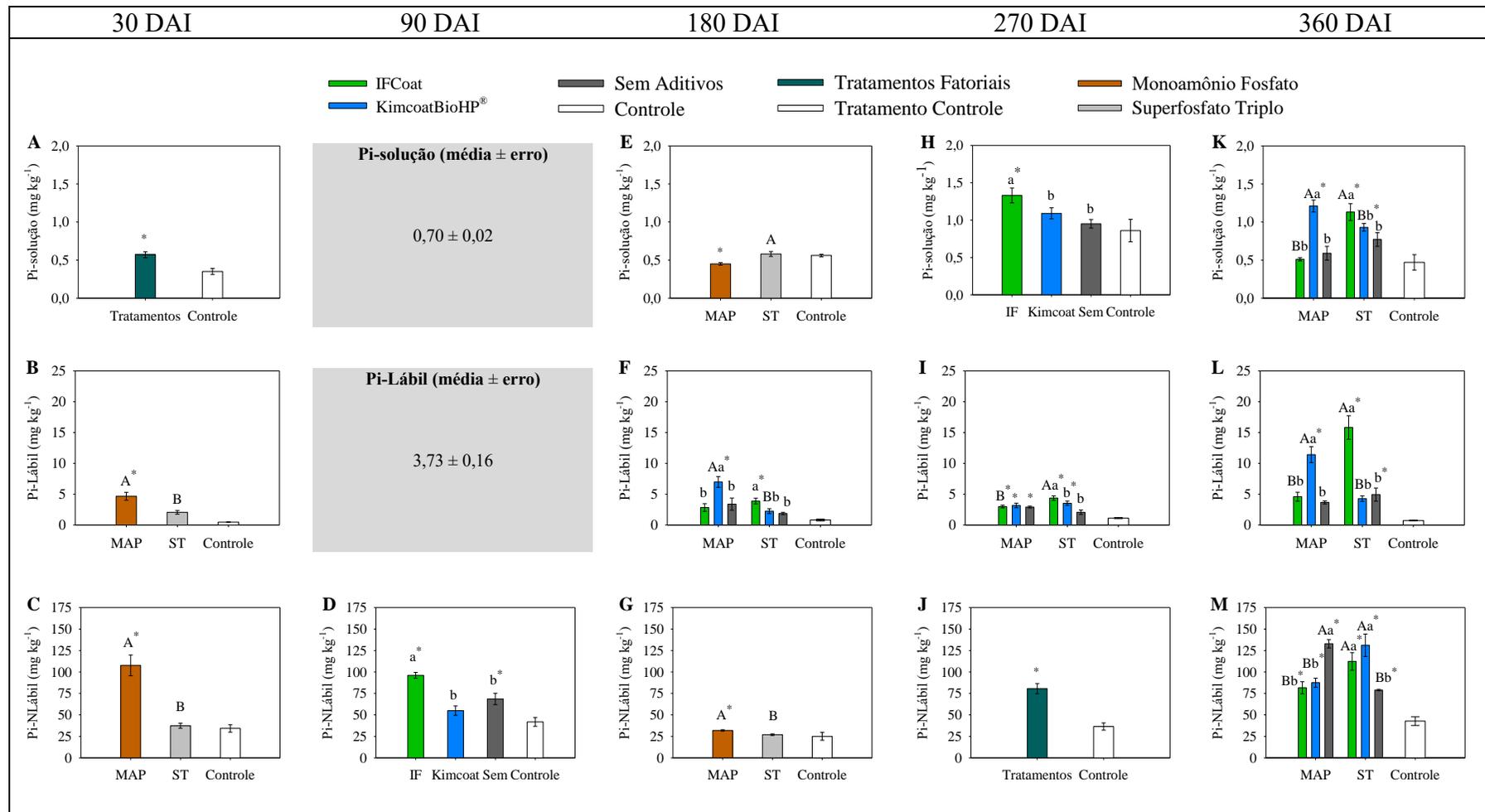
Dentre as fontes avaliadas, o monoamônio fosfato (MAP) promoveu os maiores teores de Pi-Lábil, superando o superfosfato triplo (ST), que apresentou menor acúmulo (Figura 3B). Esse comportamento está associado à maior solubilidade do MAP e a rápida dissociação em condições de incubação, liberando prontamente o  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , altamente reativo com coloides do solo (Novais; Smyth, 1999; Penn; Camberato, 2019).

O fósforo inorgânico não lábil (Pi-NLábil) corresponde à fração retida nos coloides do solo, sobretudo em óxidos e hidróxidos de Fe e Al, por meio de quimissorção ou adsorção específica (Barrow, 1986; Novais; Smyth, 1999; Souza Júnior *et al.*, 2012; Weil; Brady, 2017). Apesar dessa forte ligação, parte desse P pode, em longo prazo e sob condições específicas, retornar à solução, sendo classificado como de baixa disponibilidade, mas não totalmente inacessível. Aos 30 DAI, essa fração foi significativamente influenciada pela aplicação de fertilizantes fosfatados, além de observar diferença entre o tratamento fatorial e o controle (Tabela 3).

O MAP novamente destacou-se entre as fontes, apresentando maior valor de P adsorvido em relação à aplicação da fonte ST, além de diferir do tratamento controle (Figura 3C). Esse incremento pode ser atribuído a alta solubilidade inicial do MAP, que ao liberar fosfato na solução, favorece o contato com os coloides do solo, desencadeando rapidamente a adsorção de P e, posteriormente, essa adsorção não específica evolui para adsorção específica (Barrow *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2000; Novais; Smyth, 1999).

O P inorgânico pode ser aprisionado fisicamente dentro da estrutura dos minerais do solo, especialmente em óxidos de Fe e Al altamente cristalinos, por encapsulamento entre camadas minerais ou pela formação de complexos de esfera interna binucleares profundamente incorporados à matriz mineral, formando o fósforo ocluso (Pi-ocluso) (Fixen; Grove, 1990; Novais; Smyth, 1999; Weil; Brady, 2017). Diferente do Pi-NLábil, o P ocluso não está mais disponível para reações de troca na superfície e, por isso, é considerado virtualmente inacessível às plantas. Sua extração requer reagentes agressivos ou condições extremas, e a liberação natural no solo é mínima, mesmo ao longo de muitos anos.

Aos 30 DAI, Pi-ocluso, alterou somente com a aplicação de fertilizantes, sem diferença entre tratamento fatorial e tratamento controle (Tabela 3). A fonte MAP promoveu maior acúmulo dessa fração, superando o valor observado com a aplicação do ST (Figura 4A). Essa fração destacou-se por representar a maior reserva de P no solo, sendo a principal forma de fósforo acumulado no NVe aos 30 dias.

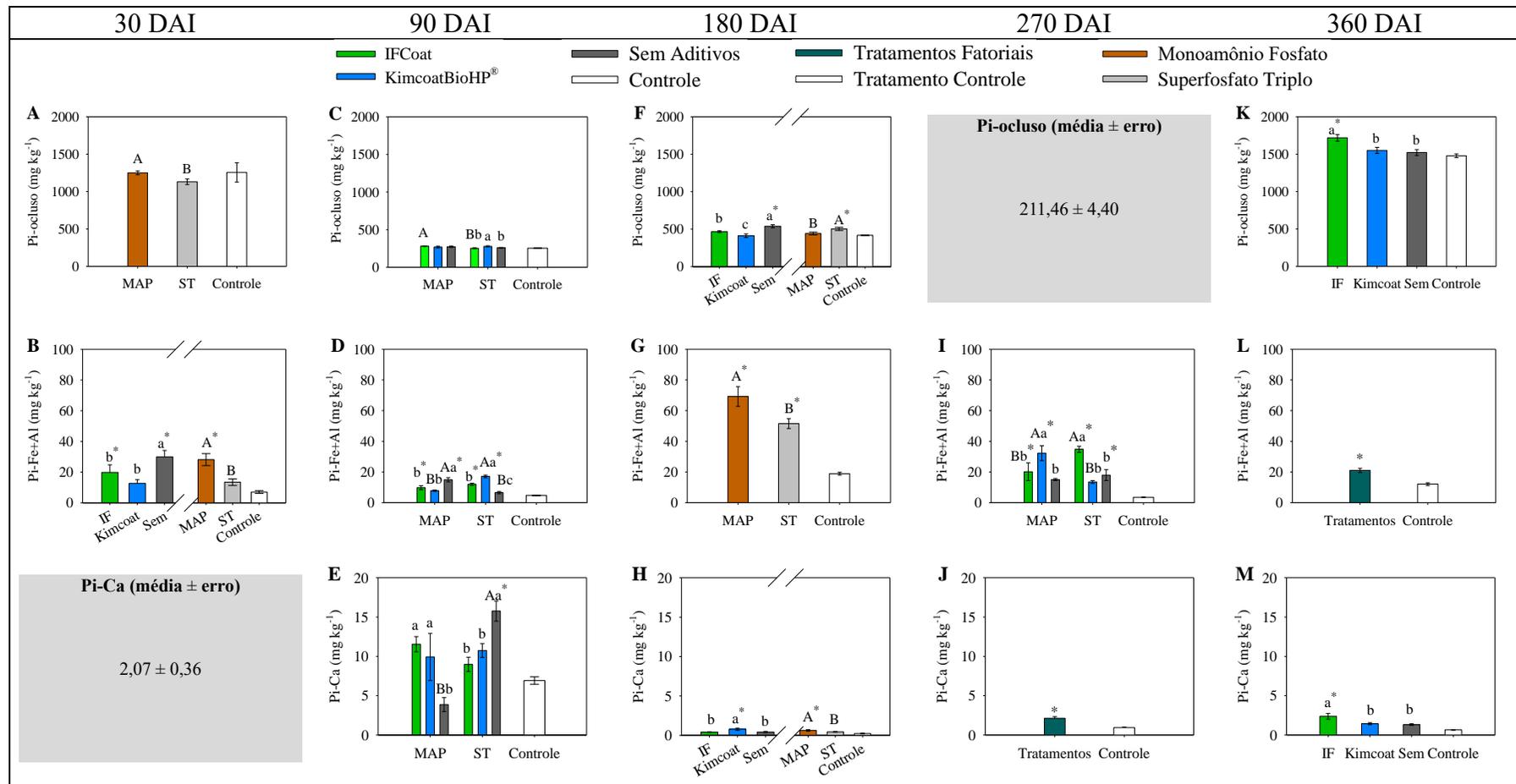


**Figura 3.** Frações de fósforo em um Nitossolo Vermelho eutrófico (NV) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). Fósforo inorgânico em solução (Pi-solúção), fósforo inorgânico lábil (Pi-Lábil) e fósforo inorgânico não lábil (Pi-NLábil), em mg kg<sup>-1</sup>.

A fração Pi-Fe+Al, representa o fósforo precipitado por meio de ligação com óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), elementos comumente presentes em solos ácidos (Novais; Smyth, 1999; Pavinato, 2007; Sample; Soper; Racz, 1980; Weil; Brady, 2017). Essa fração foi alterada pela aplicação de fertilizante e aditivos aos 30 DAI, com diferença entre o tratamento fatorial e o tratamento controle (Tabela 3).

A aplicação dos aditivos, tanto IFCoat como KimcoatBioHP<sup>®</sup> resultaram na redução do Pi-Fe+Al em relação ao tratamento sem aditivo (Figura 4B). No entanto, o aditivo KincoatBioHP<sup>®</sup> não diferiu do tratamento controle (Figura 4B). Considerando os teores de fósforo nas frações lábeis aos 30 DAI e o teor de matéria orgânica no solo no início do experimento (45,3 g dm<sup>-3</sup>), é plausível que compostos orgânicos tenham influenciado a dinâmica do fósforo, seja por competição por sítios de adsorção nos colóides ou pela formação de complexos solúveis com fosfato, reduzindo a fixação imediata aos óxidos de Fe e Al presentes no NVe (Audette *et al.*, 2020; Do Nascimento *et al.*, 2018; Guelfi *et al.*, 2022).

Em relação aos fertilizantes, o MAP apresentou maior teor de Pi-Fe+Al em comparação ao ST e ao controle (Figura 4B), sugerindo que a rápida solubilização pode intensificar a adsorção específica do fosfato aos óxidos de Fe e Al. Com o tempo, essa adsorção pode evoluir para formas mais estáveis, por meio de processos de precipitação, como a formação de ferrofosfatos e aluminofosfatos (Novais; Smyth, 1999; Souza Júnior *et al.*, 2012; Weil; Brady, 2017). Essa transição gradual entre adsorção específica e precipitação tem sido amplamente discutida na literatura (Barrow, 1986, 1986; Hingston; Posner; Quirk, 1972; Parfitt, 1978), sendo reconhecida como uma zona de sobreposição entre mecanismos superficiais e reações de baixa solubilidade. Revisões mais recentes reforçam essa perspectiva, destacando o papel das condições do solo, como acidez, presença de óxidos e atividade microbiana, na estabilização do fósforo (Anghinoni, 2004; Barrow *et al.*, 2021; Condrón; Tiessen, 2005; Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008; Weil; Brady, 2017). Esse fenômeno pode ser atribuído também à supersaturação da solução do solo com fósforo, pela aplicação do MAP, condição que favorece reações de precipitação mineral, visto que supera o limite de solubilidade dos minerais (Havlin, 2017).



**Figura 4.** Frações de fósforo em um Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). Fósforo inorgânico ocluso (Pi-occluso), fósforo inorgânico precipitado com Fe<sup>3+</sup> e Al<sup>3+</sup> livres em solução (Pi-Fe+Al) e fósforo inorgânico precipitado com Ca<sup>2+</sup> (Pi-Ca), em mg kg<sup>-1</sup>.

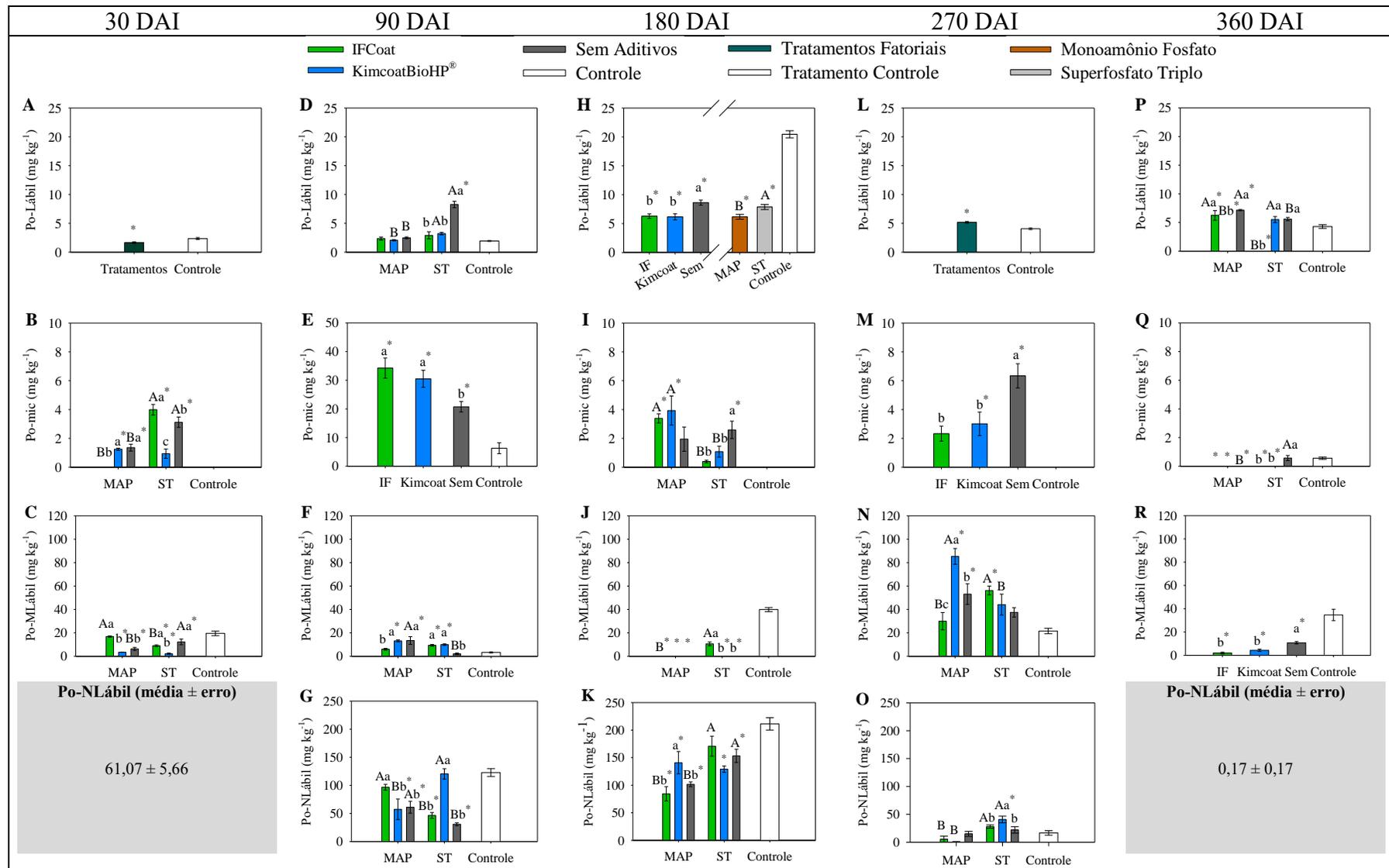
O fósforo inorgânico precipitado com cálcio (Pi-Ca) não foi alterado significativamente pelos tratamentos avaliados aos 30 DAI (Tabela 3). Esse resultado indica que, em curto prazo, a dinâmica dessa fração permaneceu estável, mesmo diante da aplicação de fertilizantes e aditivos. Essa estabilidade inicial pode estar associada às características químicas do NVe, que apresenta teor relativamente elevado de cálcio e alta saturação por bases (Tabela 2), condições que favorecem a manutenção de precipitados de fosfato de cálcio já formados no solo (Novais; Smyth, 1999).

A liberação de fósforo na solução pode ser seguida por redistribuição para frações inorgânicas ou por imobilização microbiana em formas orgânicas (Novais; Smyth; Nunes, 2007; Pavinato, 2007). A relação C/P da matéria orgânica regula a dinâmica entre mineralização e imobilização, sendo que teores de P acima de 0,2% favorecem a mineralização, enquanto valores inferiores promovem a imobilização até que a decomposição reduza essa relação (Novais; Smyth, 1999).

Aos 30 DAI, uma parcela significativa do P no solo encontrava-se em frações orgânicas, evidenciando o papel da matéria orgânica na ciclagem e retenção do nutriente (Audette *et al.*, 2020; Do Nascimento *et al.*, 2018). A fração de fósforo orgânico lábil (Po-Lábil) apresentou diferença significativa apenas entre o tratamento fatorial e o controle (Tabela 3), com menor acúmulo nas amostras que receberam fertilizantes em comparação ao solo sem adição de P (Figura 5A). Essa redução pode ser atribuída à menor necessidade de mineralização do P orgânico frente à disponibilidade inicial proporcionada pelas fontes solúveis, especialmente o MAP, podendo reduzir a atividade de fosfatase microbiana (Bünemann *et al.*, 2012; Condrón; Tiessen, 2005; Fox *et al.*, 2011; Shen *et al.*, 2011).

Além disso, a ausência de incrementos significativos pode estar relacionada à competição entre formas orgânicas e inorgânicas pelos sítios de retenção do solo (Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008), assim como aos processos de mobilização e transformação do fósforo orgânico mediados pela microbiota (Bowman; Vigil, 2002; He *et al.*, 2023; McLaren *et al.*, 2017).

A fração de fósforo microbiano (Po-mic) representa o P incorporado à biomassa microbiana viva do solo, sendo biologicamente disponível por meio da hidrólise enzimática mediada por fosfatases (Bünemann *et al.*, 2012; Fox *et al.*, 2011; Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000). Essa fração foi influenciada significativamente por fertilizantes, aditivos e pela interação entre ambos, aos 30 DAI (Tabela 3). O tratamento fatorial diferiu do controle (Tabela 3), com variações associadas à fonte e ao aditivo utilizados (Figura 5B).



**Figura 5.** Frações de fósforo em um Nitossolo Vermelho eutrófico (NVE) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após a incubação (DAI). Fósforo orgânico lábil (Po-lábil), fósforo microbiano (Po-mic) e fósforo orgânico moderadamente lábil (Po-MLábil), em mg kg<sup>-1</sup>.

Para o MAP, o aditivo IFCoat resultou em menor valor de Po-mic, enquanto o aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup> manteve níveis mais elevados dessa fração, semelhantes à aplicação sem aditivos. Entretanto, para o ST a aplicação com o aditivo IFCoat superou a aplicação dessa fonte fosfatada sem aditivos e ambas levaram a maiores valores de Po-mic que a combinação de ST com KimcoatBioHP<sup>®</sup> (Figura 5B). Quando comparadas as fontes para cada aditivo, ST sem aditivo e ST com IFCoat levaram aos maiores acúmulos dessa fração de P microbiano em relação a aplicação de MAP sem aditivo e MAP com IFCoat, respectivamente (Figura 5B). Somente MAP com IFCoat e ST com KimcoatBioHP<sup>®</sup> não diferiram do tratamento controle (Figura 5B). A rápida solubilização do MAP eleva de forma abrupta a concentração de  $H_2PO_4^-$  na solução do solo, e pode reduzir a atividade microbiana, especialmente dos microrganismos solubilizadores de fosfato (Bünemann *et al.*, 2012; Fox *et al.*, 2011). Nesse contexto, a elevada disponibilidade de P solúvel liberado pelo MAP, sobretudo quando associado ao IFCoat, pode ter restringido a imobilização microbiana observada.

Por sua vez, aos 30 DAI, o fósforo orgânico moderadamente lábil (Po-MLábil) também foi afetado significativamente pela aplicação dos aditivos e pela interação entre fertilizante e aditivo (Tabela 3), com diferença entre o tratamento fatorial e o controle. A aplicação de MAP com IFCoat resultou na maior média dessa fração, indicando possível proteção ou reciclagem eficiente do P orgânico, o que não se observou na presença do aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup> ou na ausência de aditivos para essa mesma fonte (Figura 5C). Para a fonte ST, tanto a aplicação sem aditivo quanto com IFCoat apresentaram maiores teores de Po-MLábil do que a associação com KimcoatBioHP<sup>®</sup> (Figura 5C).

Ao comparar as fontes, ST sem aditivo apresentou maior acúmulo da fração Po-MLábil em relação à aplicação de MAP sem aditivo, enquanto MAP com IFCoat superou os valores dessa fração em relação a ST com IFCoat (Figura 5C). Esses resultados podem ser explicados pela interação do P disponível com a matéria orgânica do solo, formando complexos estáveis frequentemente mediados por pontes de cálcio entre os ânions fosfato e grupos funcionais da matéria orgânica, contribuindo para a retenção e proteção do P orgânico (Braos *et al.*, 2020; Nunes *et al.*, 2020; Rivaie *et al.*, 2008). A presença de  $Ca^{2+}$  proveniente do ST pode favorecer a formação dessas pontes, promovendo a estabilização do P na fração orgânica, especialmente em solos com maior teor de matéria orgânica, como o NVe estudado ( $45,3 \text{ g dm}^{-3}$ ), ou sob manejo conservacionista (Nunes *et al.*, 2020).

A fração de fósforo orgânico não lábil (Po-NLábil), por sua vez, não foi significativamente influenciada pelos tratamentos com fertilizantes, aditivos ou sua

interação aos 30 DAI (Tabela 3). Ainda assim, apresentou alta média, próxima ao valor observado para a fração Pi-NLábil (Tabela 3), sugerindo expressivo acúmulo de P em formas estáveis e de difícil mobilização. Esse padrão é típico de solos altamente intemperizados como os Nitossolos, nos quais predominam formas orgânicas e inorgânicas pouco disponíveis (Condrón; Tiessen, 2005; Duda *et al.*, 2013; Gatiboni *et al.*, 2007; He *et al.*, 2023; Novais; Smyth, 1999; Oliveira *et al.*, 2021).

De modo geral, os resultados aos 30 DAI evidenciam um fluxo dinâmico entre as frações orgânicas e inorgânicas lábeis, com forte participação da microbiota do solo na modulação entre formas prontamente disponíveis e moderadamente lábeis. A matéria orgânica, em interação com as características mineralógicas do NVe e com a presença dos aditivos IFCoat e KimcoatBioHP<sup>®</sup>, contribui tanto para a proteção temporária do P quanto para o sequestro em frações recalcitrantes. Os aditivos parecem moderar a solubilização inicial dos fertilizantes e influenciar a retenção do P nas frações orgânicas, condicionando a disponibilidade do nutriente ao longo do tempo.

Aos 90 DAI, não foram observadas alterações significativas nas concentrações de Pi-solução entre os tratamentos avaliados (Tabela 3). Esse comportamento sugere que, nesse estágio da incubação, os mecanismos de adsorção e precipitação do P no solo foram suficientemente rápidos e intensos para tamponar variações entre as fontes e os aditivos aplicados, mantendo a solução do solo em equilíbrio. Assim, o Pi-solução permaneceu em níveis semelhantes entre os tratamentos, refletindo a forte capacidade de regulação do sistema solo em relação ao P disponível (Condrón; Tiessen, 2005; Novais; Smyth, 1999).

A fração de Pi-Lábil também não apresentou diferenças significativas pela aplicação dos fertilizantes, aditivos ou pela interação entre esses fatores (Tabela 3). No entanto, foi observado incremento das concentrações de Pi-lábil aos 90 DAI em comparação aos 30 DAI (Tabela 3), possivelmente refletindo redistribuição gradual do P entre formas disponíveis e menos disponíveis, mediada por processos de sorção, transformação mineralógica ou biogeoquímica (Novais; Smyth, 1999).

Aos 90 DAI, a fração de Pi-NLábil foi significativamente influenciada pelos aditivos, diferentemente do observado aos 30 DAI, quando apenas fertilizantes apresentaram efeito (Tabela 3). O aditivo IFCoat proporcionou o maior acúmulo de P não lábil, superando significativamente o aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup> e a condição sem aditivos (Figura 3D). Observou-se ainda que a aplicação de IFCoat e sem aditivo diferiram do controle, evidenciando maior imobilização de P. Esse acúmulo pode estar relacionado à forte adsorção do fosfato em óxidos de Fe e Al, com formação de complexos de alta

estabilidade (Souza Júnior *et al.*, 2012; Tang *et al.*, 2025; Tiecher *et al.*, 2016). Estudos recentes reforçam que tais óxidos são centrais na retenção de P em solos tropicais, tanto por adsorção e coprecipitação (Santoro; Schiavon; Celi, 2024) quanto por interações abióticas que aceleram a conversão de P orgânico em formas inorgânicas estáveis (Basinski *et al.*, 2024). Assim, o IFCoat pode ter intensificado esses processos, contribuindo para a maior estabilização do P em formas não lábeis, condicionando a disponibilidade ao longo do tempo.

Aos 90 DAI, o Pi-ocluso foi influenciado pela interação entre fertilizante e aditivo (Tabela 3), embora não tenham sido observadas diferenças significativas entre os tratamentos fatoriais e o controle, sugerindo que a oclusão de P nesse período depende da combinação entre fonte e aditivo. Para o MAP, os tratamentos com e sem aditivos não diferiram (Figura 4C), indicando que a fração oclusa derivada dessa fonte já se encontrava estabilizada em níveis elevados, independentemente da ação dos revestimentos. Em contraste, na aplicação do ST, o aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup> promoveu maior acúmulo de Pi-ocluso em comparação ao IFCoat e à aplicação sem aditivo (Figura 4C). Esse resultado sugere que a liberação gradual de P associada ao KimcoatBioHP<sup>®</sup> modulou a disponibilidade de P em solução, favorecendo a posterior oclusão em complexos estáveis com óxidos de Fe e Al, especialmente em condições de maior acidez e presença de formas cristalinas desses minerais (Condrón; Tiessen, 2005; Santoro; Schiavon; Celi, 2024; Tiecher *et al.*, 2016).

Além disso, a aplicação de IFCoat com MAP resultou no maior valor de Pi-ocluso em comparação ao mesmo aditivo aplicado ao ST (Figura 4C). Esse resultado indica que a maior solubilidade do MAP pode ter promovido um fornecimento inicial mais intenso de P à solução, parte do qual foi rapidamente adsorvido e, com o tempo, ocluído nas estruturas cristalinas de óxidos de Fe e Al. Esse processo está de acordo com a dinâmica de transformação do P em solos altamente intemperizados, nos quais o P inicialmente disponível pode ser estabilizado em formas progressivamente menos acessíveis às plantas (Helfenstein *et al.*, 2018; Parfitt, 1978; Sato *et al.*, 2009; Shen *et al.*, 2011; Souza Júnior *et al.*, 2012).

Cabe destacar que a média geral de Pi-ocluso aos 90 DAI foi inferior à observada em períodos anteriores (Tabela 3), possivelmente refletindo mobilização parcial dessa fração, favorecida por modificações microambientais ou pela atividade microbiana em solos ricos em matéria orgânica no início do experimento (Condrón; Tiessen, 2005; Hou *et al.*, 2018; Santoro; Schiavon; Celi, 2024). Contudo, essa redução não foi suficiente para

distinguir estatisticamente os tratamentos fatoriais do controle, reforçando o caráter de relativa estabilidade dessa fração mesmo diante das variações induzidas pelos insumos.

Aos 90 DAI, o Pi-Fe+Al foi significativamente influenciada pela interação entre fertilizantes e aditivos (Tabela 3), e os tratamentos fatoriais diferiram do controle. A aplicação de MAP sem aditivos resultou no maior acúmulo dessa fração em comparação ao MAP associado ao IFCoat ou ao KimcoatBioHP® (Figura 4D). A maior solubilidade do MAP, que libera P de forma rápida e intensa, pode ter favorecido a fixação específica nos óxidos de Fe e Al quando não houve modulação dos aditivos (Barrow, 1986; Corrêa; Nascimento; Rocha, 2011). Estudos recentes confirmam que os óxidos de ferro e alumínio são os principais responsáveis pela absorção e tamponamento de fósforo em solos tropicais altamente intemperizados (Yi *et al.*, 2023).

No caso do ST, o maior valor de Pi-Fe+Al foi observado com o KimcoatBioHP®, seguido do IFCoat e do tratamento sem aditivos (Figura 4D). Esse resultado sugere que, para uma fonte de menor solubilidade, os aditivos podem modular a liberação de P de forma mais gradual, favorecendo a interação com óxidos de Fe e Al. Em especial, o KimcoatBioHP®, que parece ter potencializado esse processo, promovendo maior precipitação de P nessa fração (Hou *et al.*, 2018; Rodrigues *et al.*, 2020; Yi *et al.*, 2023).

Ainda em relação ao Pi-Fe+Al aos 90 DAI, apenas os tratamentos MAP com KimcoatBioHP® e ST sem aditivos apresentaram valores semelhantes ao controle (Figura 4D). Esse resultado pode estar relacionado às características do NVe, que, por apresentar maior fertilidade natural e menor acidez em comparação a Latossolos distróficos, tende a exibir menor disponibilidade de cargas positivas ligadas a óxidos de Fe e Al, reduzindo a magnitude da fixação específica e da precipitação irreversível do P (Santos *et al.*, 2018; Souza Júnior *et al.*, 2012). Nesses ambientes, parte do P liberado pelos fertilizantes pode permanecer em formas mais lábeis ou em equilíbrio dinâmico com frações moderadamente disponíveis, o que explicaria a proximidade entre o controle e alguns tratamentos.

Além disso, parte do P inicialmente associado aos óxidos de Fe e Al pode ter evoluído para formas oclusas por reorganização estrutural dos minerais ao longo do tempo (Rodrigues *et al.*, 2020; Sato *et al.*, 2009). Essa transição reforça o papel do Pi-Fe+Al como um compartimento intermediário no sequestro progressivo do P em formas cada vez menos acessíveis. Nesse contexto, os aditivos, em especial o KimcoatBioHP®, parecem atuar modulando a velocidade desse processo. Ao promover uma liberação mais gradual de P, o aditivo aumenta a janela de tempo em que o nutriente pode interagir com

os óxidos metálicos, favorecendo a precipitação estável sem intensificar excessivamente a imobilização inicial. Tal efeito pode ser estratégico em solos eutróficos, uma vez que contribui para otimizar a disponibilidade do nutriente ao longo do ciclo, minimizando perdas por fixação imediata e garantindo reserva em frações de liberação mais lenta (Hou *et al.*, 2018; Weil; Brady, 2017).

O Pi-Ca sofreu influência significativa da aplicação de fertilizantes fosfatados e da interação deste com os aditivos, aos 90 DAI em um NVe, com diferença entre o tratamento fatorial e o tratamento controle (Tabela 3). Esta coleta foi marcada pela maior média da fração Pi-Ca ao longo do experimento, com  $9,68 \text{ mg kg}^{-1}$ , indicando um pico temporário na formação dessa fração (Tabela 3). Para a fonte MAP, as aplicações com os aditivos KimcoatBioHP<sup>®</sup> e IFCoat resultaram em maiores valores de Pi-Ca do que a aplicação de MAP sem aditivos (Figura 4E). Por outro lado, na aplicação do ST, o efeito foi inverso, sendo que o tratamento sem aditivos apresentou maior valor dessa fração que as aplicações com KimcoatBioHP<sup>®</sup> e IFCoat (Figura 4E). Somente o tratamento ST sem aditivos diferiu significativamente do controle, apresentando maior valor de Pi-Ca que o MAP sem aditivos (Figura 4E).

A precipitação de fósforo associada ao cálcio está relacionada principalmente a condições de pH mais elevadas e à disponibilidade de  $\text{Ca}^{2+}$ , favorecendo a formação de fosfatos pouco solúveis, como a hidroxiapatita, que podem temporariamente imobilizar o P no solo (Penn; Camberato, 2019; Weil; Brady, 2017). Estudos recentes em solos tropicais destacam que a precipitação é um dos principais mecanismos de retenção do fósforo, sendo modulada pela interação entre pH, disponibilidade de  $\text{Ca}^{2+}$  e dinâmica dos fertilizantes aplicados (Hanyabui *et al.*, 2020; Saentho *et al.*, 2022).

Aos 90 DAI o Po-Lábil foi influenciado pela aplicação de fertilizantes, aditivos e pela interação entre os fatores, com diferença do tratamento fatorial em relação ao controle (Tabela 3). Para MAP, os aditivos não alteraram os teores dessa fração (Figura 5D). Já no ST, IFCoat e KimcoatBioHP<sup>®</sup> reduziram o Po-Lábil em comparação ao ST sem aditivo (Figura 5D). Além disso, somente o ST sem aditivo diferiu do controle (Figura 5D). Considerando que o NVe foi previamente corrigido por calagem, a maior Po-Lábil no ST sem aditivo parece relacionar-se à ausência de modulação da liberação e a efeitos da própria fonte, como cofornecimento de Ca e interação com a matéria orgânica (Braos *et al.*, 2020; Nunes *et al.*, 2020; Rivaie *et al.*, 2008). Os revestimentos, por sua vez, amorteceram a disponibilização imediata de compostos orgânicos lábeis, possivelmente retardando a mineralização inicial e estabilizando temporariamente o P.

Esse comportamento é coerente com a natureza dinâmica do Po-Lábil, uma das frações mais sensíveis ao manejo e ao ambiente do solo (Bünemann *et al.*, 2012; Condon; Tiessen, 2005), e também com evidências recentes de que aditivos podem modular a ciclagem entre formas orgânicas e inorgânicas de P em diferentes escalas de tempo (Audette *et al.*, 2020; McLaren *et al.*, 2017).

A fração do Po-mic do NVe em estudo alterou somente com a aplicação de aditivos aos 90 DAI, havendo também diferença entre o tratamento fatorial e o tratamento controle neste período (Tabela 3). A aplicação dos aditivos, tanto IFCoat como KimcoatBioHP<sup>®</sup>, proporcionaram o maior acúmulo de Po-mic em comparação a aplicação sem aditivos (Figura 5E), sugerindo que os revestimentos podem favorecer tanto a atividade quanto a biomassa microbiana. Esse efeito é particularmente relevante, pois o Po-mic representa um compartimento altamente dinâmico e sensível às mudanças ambientais, funcionando como importante reservatório de P reciclável no solo (Brookes; Powlson; Jenkinson, 1982; Conte; Anghinoni; Rheinheimer, 2002; Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000).

Todos os tratamentos com e sem aditivos superaram significativamente o controle (Figura 5E), confirmando o papel da fertilização fosfatada no estímulo à microbiota e no acúmulo de P microbiano em solos tropicais (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982; McLaren *et al.*, 2017). A presença de aditivos modulou esse processo ao reduzir perdas rápidas por mineralização e prolongar a retenção do nutriente no compartimento biológico (Audette *et al.*, 2020; He *et al.*, 2023), reforçando que o uso de fertilizantes revestidos não apenas fornece P mineral, mas também favorece maior incorporação microbiana, contribuindo para a eficiência e sustentabilidade do manejo do P em solos tropicais (Do Nascimento *et al.*, 2018).

Considerando as correlações entre o Po-mic e as demais frações orgânicas de P (Tabela 4), observou-se um padrão temporal marcado por mudanças no sinal e na intensidade das relações. Aos 90 DAI, ocorreu correlação positiva com o Po-MLábil (Tabela 4), indicando que a biomassa microbiana pode ter contribuído para a formação de compostos orgânicos de disponibilidade intermediária, possivelmente pela liberação de resíduos celulares e produtos microbianos (Bünemann *et al.*, 2012; Turner; Haygarth, 2001). Aos 180 DAI, verificaram correlações negativas tanto com Po-Lábil quanto com Po-MLábil (Tabela 4), sugerindo que a atividade microbiana esteve associada ao consumo dessas frações como fonte de P, em um momento de decréscimo acentuado do Po-mic (Tabela 3).

Na coleta de 270 DAI, o Po-mic apresentou correlação positiva com o Po-Lábil (Tabela 4), sugerindo que parte da renovação da biomassa microbiana pode ter favorecido a reposição de formas lábeis, indicando um ciclo de mineralização e imobilização mais ativo nesse período (Bünemann *et al.*, 2012; Turner; Haygarth, 2001). Por fim, aos 360 DAI, destacou-se a correlação positiva e significativa com o Po-MLábil (Tabela 4), evidenciando que, mesmo em níveis reduzidos de Po-mic, os remanescentes da biomassa microbiana tenderam a ser convertidos em formas orgânicas de mais estáveis (Cross; Schlesinger, 1995; Zhang *et al.*, 2022), caracterizando uma acumulação em frações moderadamente lábeis.

De forma geral, as correlações confirmam que o Po-mic modulou principalmente as frações mais dinâmicas (Po-Lábil e Po-MLábil) ao longo do tempo, enquanto o Po-NLábil permaneceu desconectado do ciclo de curto prazo, sem apresentar associações significativas. Esse comportamento é coerente com a natureza recalcitrante do Po-NLábil e com o papel transitório da biomassa microbiana na dinâmica do fósforo orgânico (Bünemann *et al.*, 2012; Condrón; Tiessen, 2005; McLaren *et al.*, 2017).

**Tabela 4.** Coeficientes de correlação (r) entre o Po-mic e as frações de P orgânico lábil (Po-Lábil), moderadamente lábil (Po-MLábil) e não lábil (Po-NLábil) e os teores médios de P em cada fração orgânica em um Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe) incubado com MAP e ST com e sem aditivos por 30, 90, 180, 270 e 360 dias.

Frações	Dias de Incubação				
	30	90	180	270	360
	Po-mic	Po-mic	Po-mic	Po-mic	Po-mic
<b>Coefficientes de Correlação (r)</b>					
<b>Po-Lábil</b>	-0,34 <sup>ns</sup>	-0,16 <sup>ns</sup>	-0,51 <sup>**</sup>	0,44 <sup>*</sup>	0,16 <sup>ns</sup>
<b>Po-MLábil</b>	-0,26 <sup>ns</sup>	0,38 <sup>*</sup>	-0,55 <sup>**</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,67 <sup>**</sup>
<b>Po-NLábil</b>	-0,22 <sup>ns</sup>	-0,24 <sup>ns</sup>	-0,29 <sup>ns</sup>	0,35 <sup>ns</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>
<b>Teores médios (mg kg<sup>-1</sup>)</b>					
<b>Po-Lábil</b>	1,65	3,32	8,94	5,18	4,12
<b>Po-mic</b>	1,52	25,32	1,91	3,34	0,16
<b>Po-MLábil</b>	9,98	8,21	7,22	46,81	9,82
<b>Po-NLábil</b>	61,07	76,48	141,65	18,40	0,17
<b>Po-Total</b>	74,22	113,33	159,72	73,73	14,27

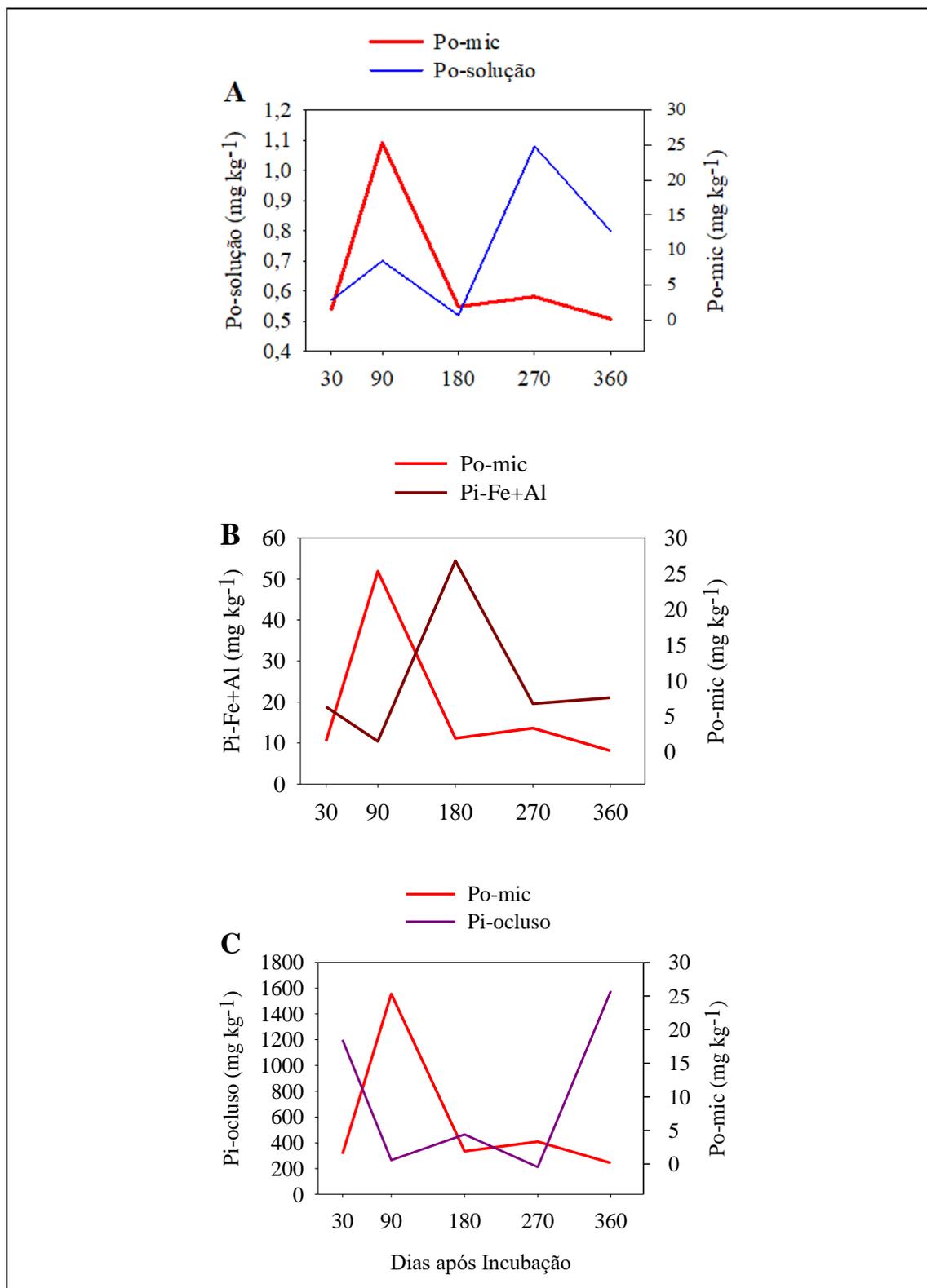
\* e \*\*, “r” significativo à 5 e 1%, respectivamente. Fonte: Autor (2025).

Entre 30 e 360 dias após a incubação, as frações de Pi-solução e o Po-mic apresentaram resultados inversos (Figura 6A). Esse padrão sugere que o fósforo liberado para a solução do solo foi rapidamente assimilado pelos microrganismos, funcionando

como fonte imediata para a biomassa microbiana. O pico de Po-mic aos 90 dias indica um período de maior atividade e acúmulo microbiano, possivelmente estimulado pela disponibilidade inicial de P lábil e de carbono de fácil decomposição. A partir desse ponto, a redução do Po-mic pode estar associada à diminuição do substrato disponível e à morte celular, liberando novamente o fósforo previamente imobilizado, explicando a elevação relativa do Pi-solução em fases posteriores. Esse comportamento evidencia o papel do Po-mic como um compartimento transitório do P, capaz de tamponar a disponibilidade do nutriente no solo em função da dinâmica da microbiota (Bünemann *et al.*, 2012; Conte; Anghinoni; Rheinheimer, 2002).

O aumento inicial da biomassa microbiana, associado à disponibilidade de P em solução e de carbono facilmente metabolizável, foi seguido pelo colapso, coincidindo com a elevação do Pi ligado a óxidos de Fe e Al (Figura 6B). Esse padrão sugere que, após a mineralização da biomassa microbiana, o P liberado foi rapidamente adsorvido por sítios específicos de alta afinidade, característicos de solos altamente intemperizados (Bünemann *et al.*, 2012; Guedes *et al.*, 2016; Novais; Smyth, 1999). Assim, o Po-mic atuou como compartimento transitório do P, cuja redução direcionou o nutriente para formas inorgânicas menos disponíveis, reforçando a limitação da resiliência do sistema na ausência de plantas capazes de recapturar o P liberado.

Padrão semelhante foi verificado entre Po-mic e Pi-ocluso (Figura 6C). Considerando que quando a biomassa microbiana cresce e depois entra em colapso, por limitação de C lábil ou de P, parte do P incorporado ao Po-mic é liberada para a solução (Novais; Smyth, 1999). Em um NVe rico em óxidos de Fe e Al, esse P liberado é rapidamente retido por sítios de alta afinidade, primeiro por quimissorção (complexos de esfera interna) e, com o tempo, migra para o interior das partículas ou cavidades, tornando-se Pi-ocluso. Esse processo é favorecido pela ausência de plantas, pela elevada reatividade dos sesquióxidos e por ciclos de umedecimento e secagem que aceleram a lise microbiana e a estabilização progressiva das superfícies minerais. Em síntese, a queda do Po-mic alimenta a formação de Pi-ocluso, reduzindo a fração reciclável do nutriente (Bünemann *et al.*, 2012; Condron; Tiessen, 2005; Gatiboni *et al.*, 2008; Helfenstein *et al.*, 2018; Novais; Smyth, 1999; Parfitt, 1978; Souza Júnior *et al.*, 2012; Weil; Brady, 2017).



**Figura 6.** Relação entre os valores médios de Po-mic com Pi-solução (A), com Pi-Fe+Al (B) e com Pi-occluso (C) em um Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe) dos 30 aos 360 dias de incubação com MAP, ST com e sem tratamento com aditivos.

Quanto ao Po-MLábil, aos 90 DAI, também mostrou efeito significativo da aplicação de fertilizantes, aditivos e da interação entre ambos, além de diferença entre

fatorial e controle (Tabela 3). Na aplicação do MAP, o aditivo IFCoat levou ao menor acúmulo dessa fração em comparação ao KimcoatBioHP<sup>®</sup> e sem aditivo (Figura 5F). Por outro lado, no ST, o tratamento sem aditivo apresentou os menores valores, enquanto a adição dos revestimentos elevou a fração Po-MLábil (Figura 5F). A aplicação de MAP sem aditivos superou em valor de Po-MLábil a aplicação de ST sem aditivos (Figura 5F). E, somente MAP com a adição de IFCoat e ST sem aditivos apresentaram valores semelhantes as proporcionadas pelo tratamento controle (Figura 5F). Esses resultados sugerem que, no MAP alguns aditivos podem retardar a mineralização ou liberação do P, enquanto no ST parecem exercer efeito protetor, estabilizando compostos orgânicos. Tal comportamento reforça a natureza dinâmica dessa fração, que funciona como elo entre disponibilidade imediata e estoque estável de P (He *et al.*, 2023; Sugihara *et al.*, 2017).

Aos 90 DAI o Po-NLábil sofreu alterações causadas pelo uso de aditivos e pela interação entre aditivos e fertilizantes, com diferença do tratamento fatorial em relação ao controle (Tabela 3). A aplicação de MAP com IFCoat proporcionou maior acúmulo dessa fração que as demais aplicações dessa fonte, tanto com KimcoatBioHP<sup>®</sup> como sem aditivo (Figura 5G). Esse resultado sugere que essas combinações podem favorecer a formação de formas mais estáveis de P orgânico, possivelmente por influenciar a microbiota e o equilíbrio entre mineralização e imobilização (Bai *et al.*, 2020; Brookes; Powlson; Jenkinson, 1982; Gao *et al.*, 2023). No caso do ST, o aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup> levou ao maior valor dessa fração em relação às aplicações de ST com IFCoat e sem aditivo (Figura 5G). Ao comparar as fontes para cada aditivo, houve diferença entre todas as combinações, com destaque para MAP com IFCoat, MAP sem aditivos e ST com KimcoatBioHP<sup>®</sup>, que resultaram nos maiores valores frente a ST com IFCoat, ST sem aditivos e MAP com KimcoatBioHP<sup>®</sup>, respectivamente (Figura 5G). As combinações MAP com IFCoat e ST com KimcoatBioHP<sup>®</sup> foram as únicas que não diferiram do controle (Figura 5G). A diferenciação das fontes e aditivos na fração Po-NLábil reforça a importância da escolha adequada do manejo para promover maior eficiência do P no solo ao direcionar parte do nutriente para estoques menos suscetíveis a perdas rápidas e capazes de sustentar a disponibilidade em longo prazo (Audette *et al.*, 2020; He *et al.*, 2023; McLaren *et al.*, 2017).

Na avaliação aos 180 DAI, o Pi-solução foi alterado apenas pelos fertilizantes (Tabela 3), com maior valor para o ST em relação ao MAP, embora somente este último tenha diferido do controle (Figura 3E). Esse padrão indica que o MAP, por conter amônio, pode favorecer a imobilização do P via complexação com Fe e Al, enquanto o ST, mais

próximo da neutralidade, libera  $\text{Ca}^{2+}$  e sustenta níveis relativamente estáveis de P em solução.

Aos 180 DAI, o Pi-lábil, apresentou sensibilidade à aplicação de fertilizantes, aditivos e à interação entre esses fatores (Tabela 3). Além disso, verificou-se diferença significativa entre os tratamentos fatoriais e o controle (Tabela 3), confirmando a eficácia dos insumos aplicados em modificar a disponibilidade imediata de fósforo no solo. A fonte MAP, quando associada ao aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup>, resultou no maior acúmulo de Pi-lábil, valor estatisticamente superior à aplicação de MAP com o aditivo IFCoat e à aplicação de MAP sem aditivo (Figura 3F). Esse resultado indica que, embora o MAP seja altamente solúvel e libere P rapidamente, o KimcoatBioHP<sup>®</sup> contribuiu para a proteção contra a imobilização, mantendo o P em formas mais acessíveis ao longo do tempo (Audette *et al.*, 2020; Do Nascimento *et al.*, 2018; Teixeira *et al.*, 2016).

No caso do ST, o aditivo IFCoat promoveu maior acúmulo de Pi-lábil em comparação ao KimcoatBioHP<sup>®</sup> e sem aditivo (Figura 3F). Além disso, o aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup> apresentou maior quantidade de fósforo lábil quando aplicado com MAP do que quando aplicado com ST (Figura 3F). Esse padrão sugere que o IFCoat favorece a disponibilização inicial do P em fontes de liberação gradual, ampliando a fração lábil (Chagas *et al.*, 2015; McLaren *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2021).

Além disso, os tratamentos com aplicação de MAP com KimcoatBioHP<sup>®</sup> e de ST com IFCoat diferiram do tratamento controle, por apresentarem maiores valores de Pi-Lábil (Figura 5F). De forma geral, os resultados evidenciam que a eficiência dos aditivos não é universal, mas modulada pela natureza química da fonte e pelas condições do solo (Audette *et al.*, 2020; McLaren *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2021).

Aos 180 dias após a incubação, o Pi-NLábil, foi alterado apenas pela aplicação de fertilizantes, sem diferença significativa entre o tratamento fatorial e o controle (Tabela 3). O MAP resultou nos maiores valores dessa fração em relação ao ST, evidenciando maior tendência à imobilização do P em formas pouco acessíveis (Figura 3G). O teste de médias revelou diferença entre MAP e o controle, sugerindo maior capacidade dessa fonte em direcionar o P para estoques estáveis. Esse comportamento está associado à acidificação promovida pelo amônio no MAP, que favorece a sorção específica em minerais de Fe e Al (Barrow, 2017; Novais; Smyth, 1999).

Aos 180 DAI, o Pi-ocluso foi influenciado tanto pela aplicação de fertilizantes como pela adição de aditivos (Tabela 3), com diferença significativa em relação ao controle. A aplicação dos aditivos reduziu a oclusão de P em comparação ao tratamento

sem aditivos, sendo que a presença de KimcoatBioHP<sup>®</sup> resultou nos menores valores frente ao IFCoat (Figura 4F). Quanto às fontes, o ST levou à maior oclusão que o MAP (Figura 4F). Ainda assim, apenas o ST diferiu do controle, reforçando o caráter de maior propensão à formação de formas pouco disponíveis. Apesar da redução observada com os aditivos, o Pi-ocluso permaneceu como uma das frações mais representativas no NVe (Tabela 3), refletindo a elevada capacidade desses solos em imobilizar o P por meio da formação de complexos de esfera interna em óxidos cristalinos de Fe e Al (Barrow, 2017; Novais; Smyth, 1999; Souza Júnior *et al.*, 2012; Zhu; Li; Whelan, 2018).

Aos 180 DAI, a fração de Pi-Fe+Al foi significativamente influenciada pela aplicação de fertilizantes fosfatados (Tabela 3). Além disso, o tratamento fatorial apresentou valores superiores ao controle (Tabela 3). Dentre as fontes avaliadas, o MAP promoveu maior acúmulo dessa fração (Figura 4G). Ambos os fertilizantes, no entanto, superaram expressivamente os valores observados no tratamento controle (Figura 4G), o que evidencia aumento da imobilização do P por precipitação com sesquióxidos do solo. Esse comportamento pode estar associado à elevada reatividade dos óxidos de Fe e Al presentes em solos altamente intemperizados, como o NVe, que favorecem a formação de complexos estáveis com o fosfato, em estágios mais avançados, esse processo pode evoluir para formas mais insolúveis, como aluminofosfatos e ferrifosfatos (Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008; Souza Júnior *et al.*, 2012; Weil; Brady, 2017). A maior suscetibilidade do MAP à formação dessas espécies insolúveis pode estar relacionada à rápida solubilidade e conseqüente aumento da concentração de P na solução do solo, excedendo a capacidade tampão e promovendo a precipitação (Barrow, 2017; Havlin, 2017).

Aos 180 DAI, a fração de Pi-Ca foi influenciada tanto pela aplicação de fertilizantes quanto de aditivos, com diferença significativa em relação ao tratamento controle (Tabela 3). Observou-se, entretanto, a redução expressiva em relação à coleta anterior, de 9,68 para 0,49 mg kg<sup>-1</sup> (Tabela 3), o que indica redistribuição do P no sistema, migrando para frações menos disponíveis ou incorporando a compartimentos inorgânicos e orgânicos mais estáveis (Bünemann *et al.*, 2012; Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013; Novais; Smyth, 1999). Entre os aditivos, o KimcoatBioHP<sup>®</sup> resultou nos maiores teores de Pi-Ca, superando o IFCoat e o tratamento sem aditivos (Figura 4H), possivelmente pela liberação mais gradual do P e maior interação com cátions como o cálcio. Quanto às fontes, o MAP promoveu maior precipitação com Ca em relação ao ST (Figura 4H), o que pode estar associado à rápida solubilidade e ao pH de reação, favorecendo a formação

de fosfatos de cálcio em microambientes menos ácidos (Barrow, 2017; Havlin, 2017; Souza Júnior *et al.*, 2012; Weil; Brady, 2017).

Embora os teores absolutos de Pi-Ca tenham sido baixos quando comparados às demais frações, tanto o aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup> quanto o fertilizante MAP resultaram em valores superiores ao controle, evidenciando a capacidade de alterar o equilíbrio do P no solo. Assim, mesmo que quantitativamente reduzida, essa fração pode atuar como um reservatório estável de P, cuja importância tende a aumentar em ambientes submetidos à calagem ou ricos em Ca, funcionando como compartimento de retenção de longo prazo (Barrow, 2017; Condon; Tiessen, 2005; Novais; Smyth, 1999).

Aos 180 DAI, a fração de Po-Lábil foi significativamente influenciada pela aplicação de fertilizantes fosfatados e aditivos, embora não tenha interação entre esses fatores (Tabela 3). Também se observou diferença entre os tratamentos fatorial e controle (Tabela 3). A presença dos aditivos IFCoat e KimcoatBioHP<sup>®</sup> promoveu redução nos teores dessa fração em comparação à aplicação sem aditivos (Figura 5H). Em relação às fontes, o ST resultou em maior acúmulo de Po-Lábil do que o MAP (Figura 5H). Notavelmente, o tratamento controle apresentou os maiores teores de Po-Lábil, superando todos os demais tratamentos (Figura 5H). A redução de Po-Lábil sugere maior mineralização induzida por fontes solúveis, resultando em conversão para Pi menos disponível (Bünemann *et al.*, 2012; Condon; Tiessen, 2005). Além disso, parte do P pode ter sido retida no Po-mic (Figura 5I), destacando a biomassa microbiana como reservatório temporário (Brookes; Powlson; Jenkinson, 1982, 1984; He *et al.*, 2023).

A fração de Po-mic foi significativamente influenciada pela aplicação de fertilizantes e pela interação com aditivos, aos 180 DAI, além do tratamento fatorial diferir do controle (Tabela 3). No MAP, os aditivos não alteraram substancialmente os teores de Po-mic, enquanto no ST observou-se maior acúmulo na ausência de aditivos (Figura 5I). IFCoat e KimcoatBioHP<sup>®</sup> foram mais eficientes quando associados ao MAP do que ao ST. Os tratamentos MAP com IFCoat, MAP com KimcoatBioHP<sup>®</sup> e ST sem aditivos superaram o controle (Figura 5I). Essa resposta sugere redistribuição de P entre compartimentos, com redução de Po-lábil acompanhada do incremento de Po-mic, evidenciando o papel dessa fração como reservatório transitório de P (Brookes; Powlson; Jenkinson, 1984; McLaren *et al.*, 2017; Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000).

Aos 180 DAI a fração de Po-MLábil foi significativamente influenciada por fertilizantes, aditivos e pela interação entre ambos, havendo diferença entre fatorial e controle (Tabela 3). Entretanto, a maioria dos tratamentos apresentou valores abaixo do

limite de detecção, indicando rápida transformação dessa fração (Figura 5J). Apenas a aplicação de ST com IFCoat resultou em teores detectáveis, sem diferir estatisticamente do controle (Figura 5J). Esses resultados evidenciam a instabilidade do Po-MLábil, cuja redução pode estar associada à mineralização e ao redirecionamento de P para compartimentos inorgânicos ou para a biomassa microbiana (Bünemann *et al.*, 2012; Turner; Haygarth, 2001).

Nesse mesmo período, a fração de Po-MLábil apresentou alterações significativas em resposta à aplicação de fertilizantes, aditivos e à interação entre ambos (Tabela 3). Também foi observada diferença entre o tratamento fatorial e o controle (Tabela 3). No entanto, diversas combinações, incluindo MAP (com e sem aditivos) e ST (sem aditivos ou com KimcoatBioHP<sup>®</sup>), resultaram em valores abaixo do limite de detecção para essa fração, sugerindo esgotamento ou rápida transformação dessa fração em outras formas ao longo do tempo (Figura 5J). Apenas a aplicação de ST com IFCoat resultou em valores detectáveis de Po-MLábil, sem diferença estatística em relação ao tratamento controle. A instabilidade dessa fração pode estar relacionada à sensibilidade, à mineralização e à adsorção competitiva com outras formas de P no solo (Turner *et al.*, 2002; Oberson & Joner, 2005).

O Po-NLábil, aos 180 DAI, foi significativamente influenciado por fertilizantes e pela interação com aditivos, além de diferir do controle (Tabela 3). Essa fração apresentou valores elevados (Tabela 3), configurando-se como uma das principais formas orgânicas no NVe. O MAP associado ao KimcoatBioHP<sup>®</sup> promoveu maior acúmulo em comparação ao MAP com IFCoat e sem aditivos, enquanto no ST não houve efeito expressivo dos aditivos (Figura 5K). A combinação ST com IFCoat superou os valores da aplicação de MAP com o mesmo aditivo, assim como, ST sem aditivos resultou em maior acúmulo que o MAP sem aditivos (Figura 5K). Apenas a combinação ST com IFCoat não diferiu do controle (Figura 5K). A predominância dessa fração sugere acúmulo de compostos orgânicos recalcitrantes, de lenta mineralização, que funcionam como estoque de longo prazo de P em solos intemperizados (Condrón; Tiessen, 2005).

A dinâmica das frações orgânicas de P aos 180 DAI revela um padrão de redistribuição entre compartimentos. O Po-Lábil apresentou redução nos tratamentos com fertilizantes e aditivos, indicando maior mineralização induzida por fontes solúveis e transferência para formas inorgânicas menos disponíveis. Parte desse P foi imobilizado temporariamente no Po-mic, especialmente nos tratamentos com MAP associado a aditivos, reforçando o papel da biomassa microbiana como reservatório transitório. Já o

Po-MLábil mostrou-se instável, com valores abaixo do limite de detecção na maioria dos tratamentos, sugerindo rápida transformação em formas inorgânicas ou incorporação ao compartimento microbiano. Em contraste, o Po-NLábil destacou-se como a principal reserva orgânica, acumulando-se em maiores quantidades, sobretudo no MAP com KimcoatBioHP® e no ST sem aditivos, evidenciando a presença de compostos recalcitrantes de lenta mineralização. Esse conjunto de resultados aponta para uma trajetória de transferência do P, sendo do Po-Lábil para o Po-mic e, posteriormente, para frações mais estáveis como o Po-NLábil, configurando um mecanismo de ciclagem e estabilização do P em solos altamente intemperizados (Brookes; Powlson; Jenkinson, 1984; Bünemann *et al.*, 2012; Condrón; Tiessen, 2005; McLaren *et al.*, 2017).

Aos 270 DAI, o Pi-solução foi influenciado pela aplicação de aditivos, havendo diferença do tratamento controle (Tabela 3). O tratamento com IFCoat manteve maiores teores em comparação ao KimcoatBioHP® e à ausência de aditivos, além de diferir do controle (Figura 3H). Esse resultado sugere que o aditivo IFCoat modulou a dinâmica do P ao longo do tempo. Embora aos 90 DAI tenha promovido maior acúmulo em frações não lábeis, aos 270 DAI favoreceu a persistência do P disponível, prolongando a janela de absorção em solos intemperizados (Barrow, 2017; Gatiboni *et al.*, 2007; Guelfi *et al.*, 2022, 2022; He *et al.*, 2023; Teixeira *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2022).

Nesse mesmo período, a fração de Pi-Lábil foi significativamente influenciada pela aplicação dos aditivos e pela interação destes com as fontes de fertilizantes, além de apresentar diferença em relação ao tratamento controle (Tabela 3). No MAP, a presença ou ausência de aditivos não promoveu diferenças significativas (Figura 3I). Já o ST associado ao IFCoat resultou no maior acúmulo de Pi-Lábil, superando inclusive o MAP com IFCoat (Figura 3I). Esse efeito reforça que a eficiência dos aditivos depende da solubilidade da fonte, sendo mais expressiva no ST, cuja dissolução é mais lenta, possibilitando ação mais marcante do revestimento no prolongamento da disponibilidade de P (Gao *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2021).

As demais frações inorgânicas apresentaram respostas distintas na coleta aos 270 DAI. O Pi-NLábil e o Pi-Ca diferiram apenas entre o tratamento fatorial e o controle (Tabela 3), sugerindo que sua formação foi efeito mais amplo da adubação fosfatada (Figuras 3J e 4J, respectivamente), sem modulação específica dos aditivos. O Pi-ocluído, por sua vez, não foi afetado pelos tratamentos, confirmando o caráter de compartimento mais estável (Tabela 3). Mesmo assim, ainda representou a maior parte do P presente no NVe nesse período (Tabela 3), como já apontado por autores que destacam o acúmulo

dessa forma em solos altamente intemperizados (Souza Júnior *et al.*, 2012; Weil; Brady, 2017). Em contraste, o Pi-Fe+Al foi significativamente alterado pela aplicação de aditivos e pela interação com fertilizantes (Tabela 3), além de apresentar diferença entre fatorial e controle.

Na aplicação do MAP, o aditivo KimcoatBioHP® apresentou maior valor de Pi-Fe+Al que o aditivo IFCoat e a não adição de aditivos (Figura 4I). Entretanto, para o ST, o aditivo IFCoat foi o que provocou maior acúmulo dessa fração em relação ao aditivo KimcoatBioHP® e a aplicação dessa fonte sem aditivos. Somente MAP sem aditivos e ST com KimcoatBioHP® não diferiram do tratamento controle (Figura 4I). Esses resultados indicam que os aditivos influenciaram os processos de precipitação de P com óxidos e hidróxidos de Fe e Al, formas predominantes de retenção de P em solos tropicais altamente intemperizados como os Nitossolos (Gatiboni *et al.*, 2008; Novais; Smyth; Nunes, 2007). Essa precipitação está relacionada à alta reatividade das superfícies coloidais de Fe e Al, especialmente na forma de fosfatos de baixa solubilidade, como  $AlPO_4$  e  $FePO_4$  (Souza Júnior *et al.*, 2012; Weil; Brady, 2017).

De forma geral, aos 270 DAI, foi observada uma clara redistribuição do Pi entre compartimentos, dependente da interação entre fonte e aditivo. No caso do MAP, a rápida solubilização favoreceu a transferência para formas menos lábeis, sobretudo Pi-Fe+Al, efeito intensificado pela presença do aditivo KimcoatBioHP®. Já para o ST, a associação com IFCoat promoveu não apenas maior acúmulo em Pi-Lábil, mas também incremento em Pi-Fe+Al, sugerindo que o revestimento atuou como modulador da transição entre P disponível e formas de maior retenção. Esses resultados reforçam que, em solos altamente intemperizados, a dinâmica do fósforo é fortemente condicionada pela interação entre a solubilidade da fonte e o efeito dos aditivos, com a biomassa microbiana e os compartimentos inorgânicos funcionando como destinos complementares para o P liberado (Barrow, 2017; Condon; Tiessen, 2005; Withers *et al.*, 2018).

As frações orgânicas de fósforo apresentaram respostas distintas à aplicação de fertilizantes e aditivos aos 270 DAI. O Po-Lábil diferiu apenas entre o conjunto dos tratamentos fatoriais e o controle (Tabela 3), com maior acúmulo nos tratamentos com insumos (Figura 5L), indicando que a adubação fosfatada, ainda que indiretamente, estimulou a disponibilidade de formas orgânicas de rápida mineralização, possivelmente mediada pelo aumento da biomassa microbiana (Brookes; Powlson; Jenkinson, 1984; Condon; Tiessen, 2005; He *et al.*, 2023; McLaren *et al.*, 2017). Em contrapartida, o Po-mic foi significativamente alterado pela aplicação dos aditivos e apresentando diferença

entre fatorial e controle (Tabela 3). Essa fração sofreu redução pela aplicação destes em relação ao tratamento sem aditivos (Figura 5M), destacando o efeito do IFCoat, que não diferiu do controle, sugerindo possível aceleração da mineralização ou estabilização dessa fração em associações mais persistentes (Hawkins *et al.*, 2022; Helfenstein *et al.*, 2018). A correlação positiva entre Po-Lábil e Po-mic (Tabela 4) reforça o papel da microbiota do solo como elo de transformação do P orgânico, funcionando tanto como reservatório quanto como fonte para a ciclagem do nutriente (Condrón; Newman, 2011).

O Po-MLábil foi a fração que mais se destacou nesse período, sendo alterada com a adição de aditivos e com a interação entre fertilizantes e aditivos, além de haver diferença entre fatorial e controle (Tabela 3). Para MAP o maior valor foi observado com a adição do aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup>, superando MAP sem aditivos e, ambas combinações superando a aplicação de MAP com IFCoat (Figura 5N). Para ST, não houve variação entre a adição ou não de aditivos junto ao ST (Figura 5N). Porém, ao comparar a ação dos aditivos entre as fontes, houve maior acúmulo em tratamentos específicos, como MAP associado ao KimcoatBioHP<sup>®</sup> e ST associado ao IFCoat (Figura 5N). Os tratamentos que não diferiram do controle foram MAP com IFCoat, ST com KimcoatBioHP<sup>®</sup> e ST sem aditivos (Figura 5N). Esses resultados sugerem que polímeros bioativos podem favorecer a estabilização parcial de compostos orgânicos intermediários, funcionando como reserva transitória de P no solo, dependendo da fonte aplicada (Chagas *et al.*, 2015; Condrón; Tiessen, 2005; Da Cruz *et al.*, 2017; De Figueiredo *et al.*, 2012; Guelfi *et al.*, 2018).

Já o Po-NLábil respondeu à aplicação de fertilizantes e à interação entre esses e aditivos, sem diferença entre o tratamento fatorial e o tratamento controle (Tabela 3). Para o MAP não houve diferenças entre os tratamentos com aditivos ou na ausência desses (Figura 5O), podendo ser atribuído à elevada solubilidade, que favorece a formação de frações lábeis de rápida absorção ou fixação inorgânica, limitando a estabilização em compartimentos de maior recalcitrância (Chagas *et al.*, 2015; Everaert *et al.*, 2017; Guelfi *et al.*, 2018; Havlin, 2017; Kassem *et al.*, 2022; Sample; Soper; Racz, 1980). Em contraste, o ST quando aplicado com os aditivos, IFCoat ou KimcoatBioHP<sup>®</sup>, resultou em teores maiores em relação a não adição de aditivos (Figura 5O), efeito atribuído à presença de polímeros capazes de promover associações organominerais estáveis ou de proteger formas intermediárias contra a mineralização (Audette *et al.*, 2020; Condrón; Tiessen, 2005; Do Nascimento *et al.*, 2018; Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000). Pode-se ressaltar que apenas a combinação entre ST e KimcoatBioHP<sup>®</sup> superou significativamente o controle (Figura 5O), reforçando o papel de revestimentos

específicos em ampliar a persistência do fósforo em compartimentos orgânicos de baixa disponibilidade (MacDonald *et al.*, 2011; McLaren *et al.*, 2017; Richardson, 2001).

Na última coleta, aos 360 DAI, o Pi-solução foi influenciado por fertilizantes, aditivos e pela interação entre ambos, com o conjunto de tratamentos fatoriais diferindo do controle (Tabela 3). Para o MAP, o aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup> resultou na maior concentração dessa fração, superando IFCoat e a ausência de aditivos, além de diferir do controle (Figura 3K). Para o ST, o aditivo IFCoat promoveu o maior Pi-solução, com maior concentração em relação a aplicação com KimcoatBioHP<sup>®</sup> e sem aditivo (Figura 3K). Além disso, todas as combinações de ST com aditivos, tanto IFCoat como KimcoatBioHP<sup>®</sup>, apresentaram valores superiores ao controle, reforçando o papel dos aditivos em ampliar a disponibilidade de fósforo, mesmo em fontes de menor solubilidade.

Esse padrão indica que a eficácia do revestimento depende da solubilidade da fonte, no MAP, que tem rápida dissolução, o KimcoatBioHP<sup>®</sup> favoreceu a manutenção do Pi-solução ao longo do tempo e no ST, de liberação mais lenta, o IFCoat ampliou a persistência do P disponível. Esse comportamento sugere que os aditivos parecem atuar como moderadores da intensidade (I) do P em solução via tamponamento do sistema Q/I, prolongando o suprimento sem, necessariamente, impedir a sorção/precipitação, consistente com o comportamento das frações Pi-Lábil e Pi-NLábil neste mesmo período (Barrow, 2017; Gao *et al.*, 2023; Novais; Smyth, 1999; Oliveira *et al.*, 2021).

Nessa última coleta, o Pi-Lábil foi influenciado por fertilizantes, aditivos e pela interação entre ambos, com os tratamentos fatoriais superando o controle (Tabela 3). Para o MAP, o aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup> promoveu maior acúmulo em comparação a IFCoat e à ausência de aditivos (Figura 3L), sugerindo que o revestimento aplicado a essa fonte de rápida dissolução reduziu perdas por fixação e prolongou a disponibilidade de P (Da Cruz *et al.*, 2017; Guelfi *et al.*, 2018; Kassem *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022). Já no ST, o IFCoat proporcionou a maior concentração de Pi-Lábil, superando KimcoatBioHP<sup>®</sup> e a ausência de aditivos, indicando que a eficiência dos aditivos depende da solubilidade da fonte e da interação com os coloides do solo, especialmente em ambientes ricos em Fe e Al como os Nitossolos (Gao *et al.*, 2023; Novais; Smyth, 1999). Os tratamentos que diferiram do controle foram MAP com KimcoatBioHP<sup>®</sup>, ST com IFCoat e ST sem aditivos (Figura 3L). Esses resultados reforçam que a escolha da fonte fosfatada e do aditivo influencia não apenas a concentração imediata de Pi-lábil, mas também a permanência no sistema. Modelos de equações estruturais demonstram que

aditivos podem modificar os fluxos entre compartimentos lábeis e não lábeis, modulando a disponibilidade do P em solos altamente intemperizados (Sales, 2015).

Nessa mesma coleta, o Pi-NLábil foi influenciado pela interação entre fertilizantes e aditivos, com diferença entre fatorial e controle (Tabela 3). O MAP sem aditivos apresentou o maior acúmulo dessa fração, sugerindo intensificação da adsorção específica aos coloides do solo, em contraste com os tratamentos que receberam revestimentos (Figura 3M). Esse comportamento pode estar associado ao legado da elevada solubilidade inicial do MAP, que libera rapidamente o P e favorece a posterior migração para compartimentos menos disponíveis (Alcarde, 2007; Oliveira *et al.*, 2021; Pavinato *et al.*, 2020). No ST, por outro lado, os aditivos IFCoat e KimcoatBioHP<sup>®</sup> aumentaram o acúmulo de Pi-NLábil em relação à aplicação sem aditivos, evidenciando que a solubilidade mais lenta e o maior teor de Ca modulam de forma distinta os processos de precipitação e retenção do P (Barrow, 1983; Reetz Jr, 2016; Sales, 2015). De forma geral, todas as combinações fatoriais superaram o controle, reforçando que as fontes fosfatadas, mesmo em estágios avançados da incubação, contribuem para a imobilização de P em formas de baixa disponibilidade no solo.

Aos 360 DAI, o Pi-ocluso foi significativamente influenciado pelos aditivos e diferiu do controle (Tabela 3), com destaque para o IFCoat, que resultou nos maiores valores em comparação ao KimcoatBioHP<sup>®</sup> e à aplicação sem revestimento (Figura 4K). Esse resultado sugere que o IFCoat promoveu liberação gradual do P, aumentando o tempo de contato com os coloides e favorecendo a difusão para o interior das partículas de Fe e Al, e é retido como formas oclusas (He *et al.*, 2023; Parfitt, 1978; Weil; Brady, 2017). Esse processo, típico de solos altamente intemperizados, também se manifesta no NVe por causa do elevado teor de óxidos de Fe, como hematita e goethita, associados a argilas de alta atividade (Santos *et al.*, 2018; Tiecher *et al.*, 2016). Assim, o pico de imobilização ao final do período indica que a dinâmica do P tende à estabilização em compartimentos de baixa disponibilidade, em parte às custas de frações orgânicas mais dinâmicas, reforçando a relevância do manejo da solubilidade e do uso de tecnologias de liberação controlada (Guelfi *et al.*, 2018; Teixeira *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2022).

Aos 360 DAI, o Pi-Fe+Al apresentou diferença apenas entre o tratamento fatorial e o controle (Tabela 3), sendo que os tratamentos com fertilizantes e aditivos resultaram em maior acúmulo em relação ao controle (Figura 4L). A manutenção desses níveis indica que, mesmo em estágios avançados da incubação, parte do P aplicado continua sendo imobilizada por precipitação com sesquióxidos, limitando a disponibilidade do nutriente

às planta (Guedes *et al.*, 2016; Novais; Smyth, 1999; Pavinato, 2007; Zhang *et al.*, 2022). Assim, mesmo estratégias de liberação gradual de P, como o uso de aditivos, não impedem a formação dessa fração, constituindo entrave à eficiência agrônômica dos fertilizantes.

Aos 360 DAI, o Pi-Ca foi influenciado pelos aditivos, havendo diferença entre os tratamentos fatoriais e controle (Tabela 3). O aditivo IFCoat se destacou, promovendo maior acúmulo dessa fração em comparação ao KimcoatBioHP® e à ausência de revestimento, além de diferir do controle (Figura 4M). Esse padrão sugere que o IFCoat modulou indiretamente a rota de retenção do P em direção a precipitados de Ca, provavelmente via alterações na cinética de liberação do P e em microambientes (pH/ion força), favorecendo supersaturação local e formação de fosfatos de cálcio. Como  $\text{Ca}^{2+}$  não foi medido, interpretamos o efeito como modulação do P-Ca, e não como aumento da disponibilidade de Ca em si (Novais; Smyth, 1999; Penn; Camberato, 2019; Pierzynski; McDowell; Thomas Sims, 2005; Sample; Soper; Racz, 1980). O efeito mostrou-se dependente do tempo e da fonte, diferindo em 90 e 180 DAI, o que é consistente com as distintas cinéticas de dissolução de MAP e ST e com a competição entre rotas Fe/Al e Ca em NVe previamente calcareado.

Aos 360 DAI, as frações orgânicas de fósforo apresentaram respostas contrastantes aos fertilizantes e aditivos, refletindo diferentes rotas de transformação no solo. O Po-Lábil alterou pelos fertilizantes e pelos aditivos, além de ser fortemente modulada pela interação entre ambos, apresentando diferença entre fatorial e controle (Tabela 3). Essa fração mostrou valores indetectáveis em MAP com KimcoatBioHP® e ST com IFCoat, enquanto os demais tratamentos mantiveram teores detectáveis, indicando que os revestimentos alteraram a dinâmica de mineralização e adsorção dessa fração (Condrón; Tiessen, 2005; Guelfi *et al.*, 2022; Hawkins *et al.*, 2022).

Em paralelo, o Po-mic, que foi influenciado por fertilizantes, aditivos, e pela interação entre esses, com diferença entre tratamento fatorial e controle (Tabela 3), praticamente desapareceu em todos os tratamentos, com exceção de ST sem aditivo e do controle, ambos com valores baixos ( $\sim 0,56 \text{ mg kg}^{-1}$ ), sugerindo esgotamento da biomassa microbiana fosfatásica e limitação de carbono lábil para sustentar a renovação (Bünemann *et al.*, 2012; Fox *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2019).

Já para o Po-MLábil, aos 360 DAI, apenas os aditivos exerceram efeito, reduzindo os teores em relação à coleta anterior, além de ocorrer diferença entre tratamento fatorial e controle (Tabela 3). Essa fração foi reduzida drasticamente pela ação dos aditivos em comparação ao tratamento sem revestimento e ao controle, evidenciando que o

recobrimento acelerou a conversão dessa reserva moderadamente disponível em outras formas (Condrón; Tiessen, 2005; Cross; Schlesinger, 1995).

Por fim, o Po-NLábil não foi influenciado pelos fatores avaliados, aos 360 DAI, mas apresentou decréscimo expressivo em relação à coleta anterior, possivelmente por mineralização de compostos recalcitrantes sob condições tropicais (Cross; Schlesinger, 1995; Novais; Smyth, 1999; Zhang *et al.*, 2022). Em conjunto, esses resultados indicam que, no longo prazo, a aplicação de aditivos modulou rotas específicas de transformação do fósforo orgânico, mas não impediu a redução progressiva das frações mais dinâmicas, comprometendo a renovação do P orgânico disponível no sistema.

#### 4.4 Conclusão

No Nitossolo Vermelho eutrófico, a aplicação das fontes fosfatadas e dos aditivos modulou de forma clara a trajetória do fósforo entre compartimentos inorgânicos e orgânicos ao longo do tempo. O MAP elevou inicialmente o Pi-Lábil, mas também intensificou a migração para formas menos disponíveis, como Pi-NLábil, Pi-Fe+Al e Pi-ocluído; esse efeito, porém, foi atenuado pela presença dos aditivos, que reduziram a fixação imediata do nutriente. A redistribuição do P após a aplicação envolveu forte participação da microbiota do solo, que imobilizou temporariamente o nutriente na fração Po-mic, atuando como um reservatório transitório entre as frações lábeis e moderadamente lábeis.

Aos 180 dias, o MAP associado ao KimcoatBioHP<sup>®</sup> mostrou maior eficiência na manutenção do Pi-Lábil e no estímulo à ciclagem biológica, evidenciada pelo acúmulo inicial de Po-mic seguido pelo aumento de Po-MLábil aos 270 dias. Esse comportamento prolongou a disponibilidade do P e reduziu perdas por fixação. O ST associado ao IFCoat também apresentou bom desempenho no período intermediário, elevando o Pi-Lábil aos 180 e 270 dias sem promover aumento expressivo das frações estáveis, revelando o potencial como fonte de liberação mais gradual.

Em contraste, o MAP sem revestimento direcionou rapidamente o P para as frações Pi-Fe+Al e Pi-NLábil a partir de 180 dias, limitando a eficiência agrônômica. Assim, o manejo mais adequado para o NVe envolve o uso de MAP com KimcoatBioHP<sup>®</sup>, que promove maior sincronização entre liberação e absorção e maior persistência da disponibilidade, ou, como alternativa, o ST com IFCoat, que oferece liberação gradual capaz de conciliar disponibilidade inicial, ciclagem biológica e menor fixação do P ao longo do tempo.

## REFERÊNCIAS

- ACHARY, V. Mohan M. *et al.* Phosphite: a novel P fertilizer for weed management and pathogen control. **Plant Biotechnology Journal**, v. 15, n. 12, p. 1493–1508, 2017.
- ALCARDE, José Carlos. Fertilizantes. *In*: NOVAIS, Roberto Ferreira *et al.* (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa-MG: SBCS, 2007. p. 737–768.
- ALI, N. S.; AL-JUTHERY, H. W. A. The application of nanotechnology for micronutrient in agricultural production (review article). **Iraqi journal of agricultural sciences**, v. 48, n. 4, 13 ago. 2017.
- ALLEONI, Luis Reynaldo Ferracciú *et al.* Química dos solos altamente intemperizados. **Química e mineralogia do solo. v. 2: aplicações**, p. 685 il, 2016.
- ALVAREZ V., V. H. NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E. OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, 2000, 25:27-33. (Boletim Informativo).
- ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. *In*: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Orgs.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba/SP: POTAFOS, 2004. p. 537–562.
- ARAÚJO, Brilhar *et al.* **Solubilização de fosfatos e potássio por bactérias rizosféricas - uma revisão.** | EBSCOhost. Disponível em: <<https://openurl.ebsco.com/contentitem/doi:10.31413%2Fnat.v12i4.17576?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:doi:10.31413%2Fnat.v12i4.17576>>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- ARENBERG, Mary R.; LIANG, Xinqiang; ARAI, Yuji. Immobilization of agricultural phosphorus in temperate floodplain soils of Illinois, USA. **Biogeochemistry**, v. 150, n. 3, p. 257–278, 2020.
- ASHRAF, M. N. *et al.* Evaluating Organic Materials Coating on Urea as Potential Nitrification Inhibitors for Enhanced Nitrogen Recovery and Growth of Maize (*Zea mays*). **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 22, n. 5, p. 1102–1108, 2019.
- AUDETTE, Yuki *et al.* Phosphorus binding to soil organic matter via ternary complexes with calcium. **Chemosphere**, v. 260, p. 127624, 1 dez. 2020.
- AZIZ, Tariq *et al.* Phosphorus deficiency in plants: Responses, adaptive mechanisms, and signaling. **Plant Signaling: Understanding the Molecular Crosstalk**, v. 9788132215424, p. 133–148, 1 out. 2014.
- BAI, Yong-Chao *et al.* Soil Chemical and Microbiological Properties Are Changed by Long-Term Chemical Fertilizers That Limit Ecosystem Functioning. **Microorganisms**, v. 8, n. 5, p. 694, 8 maio 2020.
- BALDOTTO, Maribus Altoé; VELLOSO, Ary Carlos Xavier. Eletroquímica de solos modais e de sua matéria orgânica em ambientes tropicais. **Revista Ceres**, v. 61, n. 6, p. 1012–1021, 2014.

BARBOSA, Kássia de Paula. Fontes e formas de aplicação de fertilizantes fosfatados em cultivos consecutivos de soja em Latossolo de alta fertilidade. nov. 2020.

BARROW, N. J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. **Journal of Soil Science**, v. 34, n. 4, p. 733–750, 1983.

BARROW, N. J. Reaction of Anions and Cations with Variable-Charge Soils. *In: Advances in Agronomy*. [S.l.]: Elsevier, 1986. v. 38 p. 183–230.

BARROW, N. J. Soil phosphate chemistry and the P-sparing effect of previous phosphate applications. **Plant and Soil**, v. 397, n. 1–2, p. 401–409, 2015.

BARROW, N. J. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. **Plant and Soil**, v. 410, n. 1–2, p. 401–410, 2017.

BARROW, N. J. *et al.* The soil phosphate fractionation fallacy. **Plant and Soil**, v. 459, n. 1–2, p. 1–11, 1 fev. 2021.

BASINSKI, Jade J. *et al.* Unraveling iron oxides as abiotic catalysts of organic phosphorus recycling in soil and sediment matrices. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 5930, 18 jul. 2024.

BAZANI, José Henrique. **Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto**. Mestrado em Recursos Florestais—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.

BENNETT, Elena M.; SCHIPANSKI, Meagan E. Chapter 8 - The Phosphorus Cycle. *In: WEATHERS, Kathleen C.; STRAYER, David L.; LIKENS, Gene E. (Orgs.). Fundamentals of Ecosystem Science*. [S.l.]: Academic Press, 2013. p. 159–178.

BOLAN, N. S.; WHITE, R. E.; HEDLEY, M. J. A Review of The Use of Phosphate Rocks As Fertilisers For Direct Application in Australia and New Zealand. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 30, n. 2, p. 297–313, 1990.

BOOMSMA, Anne. Structural Equation Modeling: Foundations and Extensions (Advanced Quantitative Techniques in the Social Sciences Series, Vol. 10.) by David Kaplan. **Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal**, v. 10, n. 2, p. 323–331, abr. 2003.

BORGES, W. L. *et al.* Agronomic efficiency of fertilizers with aggregate technology in the Brazilian Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 18, n. 4, p. 1–7, 31 dez. 2023.

BOWMAN, R. A.; VIGIL, M. F. Soil testing for different phosphorus pools in cropland soils of the Great Plains. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 57, n. 6, p. 479–485, nov. 2002.

BRADY, Nyle C.; WEIL, Ray R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. [S.l.]: Bookman, 2013.

BRAOS, L. B. *et al.* Dynamics of phosphorus fractions in soils treated with dairy manure. **Soil Research**, v. 58, n. 3, p. 289–298, 20 jan. 2020.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 14, n. 4, p. 319–329, 1 jan. 1982.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Phosphorus in the soil microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 16, n. 2, p. 169–175, jan. 1984.

BÜNEMANN, E. K. *et al.* Rapid microbial phosphorus immobilization dominates gross phosphorus fluxes in a grassland soil with low inorganic phosphorus availability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 51, p. 84–95, ago. 2012.

BYRNE, Barbara M. **Structural equation modeling with AMOS: basic concepts, applications, and programming**. Second edition (Online-Ausg.) ed. New York: Routledge, 2010.

CAIONE, Gustavo; PRADO, Renato de Mello. **Nutrição e adubação de pastagens**. [S.l.]: Fcav, 2021.

CALHEIROS, A. S. *et al.* Nível crítico de fósforo por diferentes extratores químicos em Neossolo Flúvico alcalino cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 7, n. 4, p. 590–596, 5 dez. 2012.

CARMO, Thiago Rezende Lima Do; CABALLERO, Segundo Sacramento Urquiaga; ALVES, Bruno José Rodrigues. Balanço geral de nitrogênio e fósforo na agropecuária brasileira no período de 1990 a 2020. *In*: ZONTA, Everaldo; PEREIRA, Marcos Gervasio (Eds.). **Agricultura, Mudanças Climáticas e Segurança Alimentar - Anais do VI Simpósio ABC (Argentina-Brasil-Cuba)**. 1. ed. [S.l.]: Atena Editora, 2023. p. 356–361.

CARNEIRO, Leandro Flávio *et al.* Frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um Latossolo com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 483–491, abr. 2011.

CARRINGTON, Damian. Phosphate fertiliser “crisis” threatens world food supply. **The Guardian**, 2019.

CARVALHO, Rui *et al.* Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 3, p. 557–565, 2001.

CEKINSKI, E. Fertilizantes Fosfatados. *In*: CEKINSKI, E. *et al.* (Eds.). **Tecnologia de Produção de Fertilizantes**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990. p. 95–129.

CHAGAS, Wantuir Filipe Teixeira *et al.* Productive characteristics, nutrition and agronomic efficiency of polymer-coated MAP in lettuce crops. **Revista ciência agrônômica**, v. 46, n. 2, 2015.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore. v. 84, p. 133–144, 1957.

- CHEN, C. R. *et al.* Effects of afforestation on phosphorus dynamics and biological properties in a New Zealand grassland soil. **Plant and Soil**, v. 220, n. 1–2, p. 151–163, 2000.
- CHIEN, S. H. *et al.* Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 89, n. 2, p. 229–255, 2011.
- CHOWDHURY, Rubel Biswas *et al.* Key sustainability challenges for the global phosphorus resource, their implications for global food security, and options for mitigation. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 945–963, jan. 2017.
- CONDRON, L. M.; GOH, K. M. Effects of long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zealand. **Journal of Soil Science**, v. 40, n. 2, p. 383–395, 1989.
- CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by  $^{31}\text{P}$  nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, v. 36, n. 2, p. 199–207, 1985.
- CONDRON, L. M.; TIESSEN, H. Interactions of organic phosphorus in terrestrial ecosystems. *In*: TURNER, B. L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. S. (Orgs.). **Organic phosphorus in the environment**. 1. ed. UK: CABI Publishing, 2005. p. 295–307.
- CONDRON, Leo M.; NEWMAN, Susan. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, n. 5, p. 830–840, 2011.
- CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 925–930, dez. 2002.
- CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 893–900, out. 2003.
- CORRÊA, Rossini Mattos; NASCIMENTO, Clístenes Williams Araújo Do; ROCHA, Alexandre Tavares Da. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 153–159, 2 mar. 2011.
- COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M. Óxidos de ferro. *In*: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e mineralogia do solo**. 1. ed. Viçosa: SBCS, 2009. v. 1 p. 505–572.
- COSTA, Karla Samylle De Queiroz *et al.* Fósforo no sistema solo-planta: uma revisão. **Observatório de la economía latinoamericana**, v. 22, n. 6, p. e5361, 20 jun. 2024.
- COSTA, Marlon *et al.* Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus Plantations, Brazil. **Forests**, v. 7, n. 1, p. 15, 2016.

CROSS, Anne Fernald; SCHLESINGER, William H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, v. 64, n. 3–4, p. 197–214, 1995.

DA CRUZ, Diego Fernandes *et al.* Role of Polymeric Coating on the Phosphate Availability as a Fertilizer: Insight from Phosphate Release by Castor Polyurethane Coatings. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 29, p. 5890–5895, 26 jul. 2017.

DA SILVA, Erika Caitano *et al.* Does Structural Equation Modeling Provide a Holistic View of Phosphorus Acquisition Strategies in Soils of Amazon Forest? **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 3, p. 3334–3347, set. 2022.

DE FIGUEIREDO, Cícero Célio *et al.* Polymer-coated phosphate fertilizer and liming on the production and morphological parameters of corn. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 43, n. 3, p. 446–452, 2012.

DO NASCIMENTO, Carlos A. C. *et al.* Phosphorus Mobility and Behavior in Soils Treated with Calcium, Ammonium, and Magnesium Phosphates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, n. 3, p. 622–631, 2018.

DONAGEMMA, Guilherme Kangussu *et al.* Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003–1020, 2016.

DUDA, Gustavo Pereira *et al.* Avaliação da biodisponibilidade de fósforo em diferentes classes de solos do Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 4, p. 1563–1576, 30 ago. 2013.

EISENHAEUER, Nico *et al.* From patterns to causal understanding: Structural equation modeling (SEM) in soil ecology. **Pedobiologia**, v. 58, n. 2–3, p. 65–72, mar. 2015.

ELSER, James; BENNETT, Elena. A broken biogeochemical cycle. **Nature**, v. 478, n. 7367, p. 29–31, 2011.

EVERAERT, Maarten *et al.* Agronomic Effectiveness of Granulated and Powdered P-Exchanged Mg-Al LDH Relative to Struvite and MAP. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 32, p. 6736–6744, 16 ago. 2017.

FAGERIA, Nand Kumar. **The Use of Nutrients in Crop Plants**. 0. ed. [S.l.]: CRC Press, 2009.

FALCÃO, Newton Paulo De Souza; SILVA, José Risonei Assis Da. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 3, p. 337–342, 2004.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt: Pacote experimental designs.**, 2021.

FIXEN, P. E.; GROVE, J. H. Testing Soils for Phosphorus. *In*: WESTERMAN, R. I. (Ed.). **Soil Testing and Plant Analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 1990. v. 3 p. 141–180.

FONSECA, D. M., ALVAREZ V., V. H., NEVES, J. C. L., GOMIDE, J. A., NOVAIS, R. F. & BARROS, N. F. Níveis críticos de fósforo em amostras de solos para estabelecimento de *Andropogon gayanus*, *Brachiaria decumbens*, *Hyparrhenia rufa*. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Campinas v.12, n. 4, p. 49-58, 1988.

FOX, John; NIE, Zhenghua; BYRNES, Jarrett. **Sem: Structural equation models.** , 2024. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=sem>>

FOX, Thomas R. *et al.* Phosphorus Nutrition of Forest Plantations: The Role of Inorganic and Organic Phosphorus. *In*: BÜNEMANN, Else; OBERSON, Astrid; FROSSARD, Emmanuel (Orgs.). **Phosphorus in Action**. Soil Biology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. v. 26 p. 317–338.

FREITAS, Idelfonso Colares De. **Atributos de um Neossolo Quartzarênico da pré-Amazônia sob agroecossistemas de produção familiar**. Goiânia-GO: UFG, 2013.

GAMA-RODRIGUES, A. C. *et al.* An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. **Biogeochemistry**, v. 118, n. 1–3, p. 453–469, 17 abr. 2014.

GAO, Shengchao *et al.* Effects of humic acid-enhanced phosphate fertilizer on wheat yield, phosphorus uptake, and soil available phosphorus content. **Crop Science**, v. 63, n. 2, p. 956–966, 1 mar. 2023.

GATIBONI, Luciano Colpo *et al.* Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 691–699, ago. 2007.

GATIBONI, Luciano Colpo *et al.* Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos líquidos de suínos em pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1753–1761, 2008.

GATIBONI, Luciano Colpo; BRUNETTO, Gustavo; KAMINSKI, João. **Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações**. 2013.

GATIBONI, Luciano Colpo; KAMINSKI, João; SANTOS, Danilo Rheinheimer dos. Modificações nas formas de fósforo do solo após extrações sucessivas com Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 363–371, 2005.

GRACE, James B. **Structural Equation Modeling and Natural Systems**. 1. ed. Cambridge: University Press, 2006.

GRACE, James B.; BOLLEN, Kenneth A. Representing general theoretical concepts in structural equation models: the role of composite variables. **Environmental and Ecological Statistics**, v. 15, n. 2, p. 191–213, jun. 2008.

GUEDES, Rafael Silva *et al.* Adsorption and desorption kinetics and phosphorus hysteresis in highly weathered soil by stirred flow chamber experiments. **Soil and Tillage Research**, v. 162, p. 46–54, set. 2016.

GUELF, Douglas *et al.* Innovative Phosphate Fertilizer Technologies to Improve Phosphorus Use Efficiency in Agriculture. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 21, 1 nov. 2022.

GUELF, Douglas Ramos *et al.* Monoammonium phosphate coated with polymers and magnesium for coffee plants. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 3, p. 261–270, 1 maio 2018.

GUO, Fengmao; YOST, Russell S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Science**, v. 163, n. 10, p. 822–833, 1998.

HAIR, Joseph F. *et al.* Multivariate data analysis (8. Baskı). **Eight Edition, Cengage: Learning EMEA**, 2019.

HAIR JR., Joseph F. *et al.* **Análise Multivariada De Dados**. 6. ed. [S.l.]: Bookman, 2009.

HANSEL, Fernando Dubou. **Fertilizantes fosfatados aplicados a lanço e em linha na cultura da soja sob semeadura direta**. Unpublished, , 2013. Disponível em: <<http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.3641.7529>>. Acesso em: 12 ago. 2025

HANYABUI, Emmanuel *et al.* Phosphorus sorption in tropical soils. **AIMS Agriculture and Food**, v. 5, n. 4, p. 599–616, 2020.

HAVLIN, John L. **Soil Fertility and Fertilizers**. 8. ed. [S.l.]: Pearson India, 2017.

HAWKINS, J. M. B. *et al.* The effect of soil organic matter on long-term availability of phosphorus in soil: Evaluation in a biological P mining experiment. **Geoderma**, v. 423, p. 115965, 1 out. 2022.

HAYNES, R. J.; MOKOLOBATE, M. S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 59, n. 1, p. 47–63, jan. 2001.

HE, Xianjin *et al.* Global patterns and drivers of phosphorus fractions in natural soils. **Biogeosciences**, v. 20, p. 4147–4163, 2023.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in Inorganic and Organic Soil Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 5, p. 970–976, set. 1982.

HELFENSTEIN, Julian *et al.* Soil solution phosphorus turnover: derivation, interpretation, and insights from a global compilation of isotope exchange kinetic studies. **Biogeosciences**, v. 15, n. 1, p. 105–114, 8 jan. 2018.

HINGSTON, F. J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite - I: the role of the proton in determining adsorption envelopes. **Journal of Soil Science**, v. 23, p. 177–191, 1972.

HOU, Enqing *et al.* A structural equation model analysis of phosphorus transformations in global unfertilized and uncultivated soils. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 30, n. 9, p. 1300–1309, set. 2016.

HOU, Enqing *et al.* Solubility of phosphorus in subtropical forest soils as influenced by low-molecular organic acids and key soil properties. **Geoderma**, v. 313, p. 172–180, 1 mar. 2018.

HOYLE, Rick H.; SMITH, Gregory T. Formulating clinical research hypotheses as structural equation models: A conceptual overview. **Journal of Consulting and Clinical Psychology**, v. 62, n. 3, p. 429–440, 1994.

HU, Li-tze; BENTLER, Peter M. Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. **Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal**, v. 6, n. 1, p. 1–55, 1999.

ICHINOSE, Yuri *et al.* How do reactive aluminum and iron phases control soil organic carbon and phosphate adsorption capacity in agricultural topsoils across Japan? **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 71, n. 1, p. 38–52, 2 jan. 2025.

IKHAJIAGBE, Beckley *et al.* RETRACTED: Major phosphorus in soils is unavailable, yet critical for plant development. **Notulae Scientia Biologicae**, v. 12, n. 3, p. 500–535, 29 set. 2020.

IRIONDO, José M.; ALBERT, María J.; ESCUDERO, Adrián. Structural equation modelling: an alternative for assessing causal relationships in threatened plant populations. **Biological Conservation**, v. 113, n. 3, p. 367–377, out. 2003.

JASINSKI, Stephen. **Phosphate Rock, Mineral Commodity Summaries 2025.** , 2025.

JASINSKI, Stephen M. **Phosphate Rock, Mineral Commodity Summaries 2021.** , 2021.

JOLLIFFE, I. T. **Principal Component Analysis.** New York: Springer-Verlag, 2002.

JÖRESKOG, Karl G.; SÖRBOM, Dag. Recent Developments in Structural Equation Modeling. **Journal of Marketing Research**, v. 19, n. 4, p. 404–416, nov. 1982.

KAFLE, Arjun *et al.* Harnessing Soil Microbes to Improve Plant Phosphate Efficiency in Cropping Systems. **Agronomy**, v. 9, n. 3, p. 127, 8 mar. 2019.

KAISER, Henry F. The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 141–151, abr. 1960.

KAPLAN, D. **Structural equation modeling: foundations and extensions.** Thousand Oaks, California: Sage Publications, 2000. v. 10

KASSEM, Ihsane *et al.* Biodegradable all-cellulose composite hydrogel as eco-friendly and efficient coating material for slow-release MAP fertilizer. **Progress in Organic Coatings**, v. 162, p. 106575, 1 jan. 2022.

KLIN, Rex B. **Principles and practice of structural equation modeling, 4th ed.** New York, NY, US: The Guilford Press, 2016. p. xvii, 534

KLOTZBÜCHER, Anika *et al.* Testing mechanisms underlying the Hedley sequential phosphorus extraction of soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 182, n. 4, p. 570–577, ago. 2019.

KORKMAZ, Selcuk; GOKSULUK, Dincer; ZARARSIZ, Gokmen. MVN: An R Package for Assessing Multivariate Normality. **The R Journal**, v. 6, n. 2, p. 151, 2014.

KOUR, Divjot *et al.* Biodiversity, current developments and potential biotechnological applications of phosphorus-solubilizing and -mobilizing microbes: A review. **Pedosphere**, v. 31, n. 1, p. 43–75, fev. 2021.

LÊ, Sébastien; JOSSE, Julie; HUSSON, François. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, p. 1–18, 2008.

LEHNINGER, Albert L. **Short course in biochemistry**. New York: Worth Publishers, 1973.

LEITE, Jacqueline Nayara Ferraça *et al.* Frações orgânicas e inorgânicas do fósforo no solo influenciadas por plantas de cobertura e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 11, p. 1880–1889, nov. 2016.

LIMA, Regina Lúcia Félix De Aguiar. Micorrizas arbusculares e absorção de fósforo em função da capacidade de fixação de fósforo do solo e da competição com a microbiota. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1062–1079, 1 jun. 2020.

LINDSAY, W. L.; LEHR, J. R.; STEPHENSON, H. F. Nature of the Reactions of Monocalcium Phosphate Monohydrate in Soils: III. Studies with Metastable Triple-Point Solution. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 5, p. 342–345, 1959.

LINDSAY, W. L.; STEPHENSON, H. F. Nature of the Reactions of Monocalcium Phosphate Monohydrate in Soils: II. Dissolution and Precipitation Reactions Involving Iron, Aluminum, Manganese, and Calcium. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 1, p. 18–22, 1959.

LINDSAY, Willard L. **Chemical Equilibria in Soils**. New York: John Wiley & Sons, 1979.

LISHINSKI, Alex. lavaanPlot: Path diagrams for Lavaan models via DiagrammeR. **R package version 0.6**, v. 2, p. 2021, 2021.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; CUNHA, J. F. da. **Superfosfato Simples**. São Paulo: Gráfica Nagy, 2010.

LU, Chun *et al.* Phosphorus Dynamics in Managed and Natural Soils: SEM-PLS Analysis of Vaccinium, Forest, and Grassland Ecosystems. **Plants**, v. 14, n. 2, p. 189, jan. 2025.

LUO, Yuan-Jun; YUAN, Da-Gang; HUANG, Lai-Ming. Soil phosphorus fraction and availability dynamics along a 2-million-year soil chronosequence in northern Hainan Island, China. **Geoderma**, v. 448, p. 116957, ago. 2024.

MACDONALD, Graham K. *et al.* Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 7, p. 3086–3091, 2011.

MALAVOLTA, E. *et al.* Estudos sobre a nutrição mineral do arroz: XV. absorção radicular e foliar do radiofosforo pelas variedades IAC-47 e IAC-435. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 38, n. 2, p. 695–721, 1981.

MARSCHNER, Horst. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed ed. London Waltham, MA: Academic Press, 2012.

MARTINAZZO, Rosane *et al.* Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 563–570, jun. 2007.

MCLAREN, Timothy I. *et al.* The chemical nature of organic phosphorus that accumulates in fertilized soils of a temperate pasture as determined by solution<sup>31</sup>P NMR spectroscopy. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 180, n. 1, p. 27–38, fev. 2017.

MIGNACCA, Flávia Alessandra. **Fracionamento de fósforo de um Argissolo Vermelho distroférico submetido a manejos de correção e adubação em sistema de integração lavoura-pecuária. 2016**. Universidade do Oeste Paulista, UNOESTE, Brasil, 2016. Disponível em: <<http://bdt.d.unoeste.br:8080/jspui/handle/jspui/1046>>

MIHAILESCU, E. *et al.* Phosphorus balance and use efficiency on 21 intensive grass-based dairy farms in the South of Ireland. **The Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 3, p. 520–537, 2015.

MIRABELLO, M. J. *et al.* Soil phosphorus responses to chronic nutrient fertilisation and seasonal drought in a humid lowland forest, Panama. **Soil Research**, v. 51, n. 3, p. 215, 2013.

MIRANDA, Li Chaves. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados de diferentes tempos de liberação aplicados em solos de textura contrastante**. Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal—[S.l.]: UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI, 2023.

MITCHELL, R. J. Testing Evolutionary and Ecological Hypotheses Using Path Analysis and Structural Equation Modelling. **Functional Ecology**, v. 6, n. 2, p. 123, 1992.

MME. **Relatório Técnico 54 - Perfil do Enxofre**. Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2009.

MOREIRA, A. *et al.* Avaliação da disponibilidade do fósforo no solo por métodos isotópico, químicos e biológico. **Scientia Agricola**, v. 54, p. 1–2, 1997.

MOREIRA, Fatima Maria De Souza; SIQUEIRA, Jose Oswaldo. **Microbiologia E Bioquímica Do Solo**. 2. ed. [S.l.]: Editora da UFLA, 2006.

MOUSAVI, Seyed Roohollah *et al.* Cause-effect relationships using structural equation modeling for soil properties in arid and semi-arid regions. **CATENA**, v. 232, p. 107392, 1 nov. 2023.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, p. 31–36, 1962.

NEVES, Jorge Alexandre Barbosa. Modelo de equações estruturais: uma introdução aplicada. 2018.

NOVAIS, R. F.; KAMPRATH, E. J. Parametros das isotermas de adsorcao de fosforo como criterio de recomendacao de adubacao fosfatada. Parte de tese. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 3, 1979.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999.

NOVAIS, Roberto Ferreira; SMYTH, T. Jot; NUNES, Flancer Novais. Fósforo. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa-MG: [S.n.]. p. 471–550.

NUNES, Ana Paula Pereira; SANTOS, César Ferreira; GUELFÍ, Douglas. Interfaces between biodegradable organic matrices coating and MAP fertilizer for improve use efficiency. **Science of The Total Environment**, v. 804, p. 149896, 15 jan. 2022.

NUNES, Rafael de Souza *et al.* Distribution of Soil Phosphorus Fractions as a Function of Long-Term Soil Tillage and Phosphate Fertilization Management. **Frontiers in Earth Science**, v. 8, p. 350, 2 set. 2020.

OLIVEIRA, Lara Caroline Alves De *et al.* Frações de fósforo em função do uso de fertilizantes fosfatados em distintas classes de solo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 4, p. 1–15, 2021.

OLIVEIRA, Maiara Prates; MALAGOLLI, Guilherme Augusto; CELLA, Daltro. MERCADO DE FERTILIZANTES: dependência de importações do Brasil. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 1, p. 489–498, 2019.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A. *et al.* **Recomendação agrônômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho**. - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1120362/recomendacao-agronomica-de-cepas-de-bacillus-subtilis-cnpms-b2084-e-bacillus-megaterium-cnpms-b119-na-cultura-do-milho>>. Acesso em: 11 ago. 2025.

PARFITT, R. L. Anion Adsorption by Soils and Soil Materials. *In*: **Advances in Agronomy**. [S.l.]: Elsevier, 1978. v. 30 p. 1–50.

PAULY, D. G.; MALHI, S. S.; NYBORG, M. Controlled-release P fertilizer concept evaluation using growth and P uptake of barley from three soils in greenhouse. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 82, n. 2, p. 201–210, 1 maio 2002.

PAVINATO, Paulo S. *et al.* Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports 2020 10:1**, v. 10, n. 1, p. 1–11, 28 set. 2020.

PAVINATO, Paulo Sérgio. **Dinâmica do fósforo no solo em função do manejo e da presença de resíduos em superfície**. Tese (Doutorado em Agronomia-Agricultura)—Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 2007.

PENN, Chad; CAMBERATO, James. A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. **Agriculture**, v. 9, n. 6, p. 120, 8 jun. 2019.

PEREIRA, Suziane dos Santos. **Modelagem de Equações Estruturais no Software R**, 2013.

PESSOA-DE-SOUZA, Marco Aurélio *et al.* Comportamento químico de Nossolos Quartzarênicos em Mineiros, sudoeste goiano. **Geosciences = Geociências**, v. 34, n. 3, p. 335–347, 24 jul. 2015.

PIERZYNSKI, Gary M.; MCDOWELL, Richard W.; THOMAS SIMS, J. Chemistry, Cycling, and Potential Movement of Inorganic Phosphorus in Soils. *In*: THOMAS SIMS, J.; SHARPLEY, Andrew N. (Orgs.). **Agronomy Monographs**. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 2005. p. 51–86.

PILATI, Ronaldo; LAROS, Jacob Arie. Modelos de equações estruturais em psicologia: conceitos e aplicações. **Psicologia: Teoria e Pesquisa**, v. 23, n. 2, p. 205–216, jun. 2007.

PIZZEGHELLO, Diego *et al.* Bioactivity of Size-Fractionated and Unfractionated Humic Substances From Two Forest Soils and Comparative Effects on N and S Metabolism, Nutrition, and Root Anatomy of *Allium sativum* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1203, 14 ago. 2020.

PROCHNOW, Luíz Ignácio; ALCARDE, José Carlos; CHIEN, Sen Hsuing. Eficiência agrônômica dos fosfatos totalmente acidulados. *In*: YAMADA, Tsuioshi; ABDALLA, Silvia Regina Stipp (Eds.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba-SP: POTAFOS, 2004. p. 605–654.

R CORE TEAM. **R: O Projeto R para Computação Estatística**. ViennaR Foundation for Statistical Computing, , 2021. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 14 ago. 2025

RAFIQUE, Mazhar *et al.* Residual effects of biochar and phosphorus on growth and nutrient accumulation by maize (*Zea mays* L.) amended with microbes in texturally different soils. **Chemosphere**, v. 238, 1 jan. 2020.

RAHMAN, Mohammad A. *et al.* Soil Phosphorus Partition and Transformations Under Diverse Land Uses. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 55, n. 15, p. 2232–2247, 21 ago. 2024.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. [S.l.]: Editora Agronômica Ceres, 1991.

RAIJ, B. van. *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996.

RAIJ, B. van. Fósforo no solo e interação com outros elementos. *In*: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Eds.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato, 2004.

REDEL, Y. *et al.* Assessment of phosphorus status influenced by Al and Fe compounds in volcanic grassland soils. **Journal of soil science and plant nutrition**, n. ahead, p. 0–0, 2016.

REETZ JR, Harold F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. Paris: International Fertilizer industry Association - IFA, 2016.

REVELLE, William. **psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research**. Northwestern University, Evanston, Illinois., 2025. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=psych>>. Acesso em: 26 set. 2025

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Bras. Ci. Solo**, v. 24, p. 589–597, 2000.

RICHARDSON, A. E. Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. **Functional Plant Biology**, v. 28, n. 9, p. 897–906, 2001.

RIVAIE, A. A. *et al.* Effect of phosphate rock and triple superphosphate on soil phosphorus fractions and their plant-availability and downward movement in two volcanic ash soils under *Pinus radiata* plantations in New Zealand. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 82, n. 1, p. 75–88, set. 2008.

RODRIGUES, Marcos *et al.* Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104770, 2020.

ROLIM NETO, F. C. *et al.* Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 953–964, dez. 2004.

ROSSEEL, Yves. lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling. **Journal of Statistical Software**, v. 48, p. 1–36, 24 maio 2012.

ROY, Eric D. *et al.* The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, v. 2, n. 5, p. 16043, 18 abr. 2016.

SAENTHO, Apinya *et al.* Speciation and pH- and particle size-dependent solubility of phosphorus in tropical sandy soils. **Geoderma**, v. 408, p. 115590, fev. 2022.

SALES, Marcus Vinicius da silva. **Modelagem de equações estruturais aplicada ao estudo do ciclo do P em solos tropicais**. Campus Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2015.

SALES, M. V. S. *et al.* Respecification of structural equation models for the P cycle in tropical soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 102, n. 3, p. 347–358, 23 jul. 2015.

SALES, Marcus V. S. *et al.* Structural equation modeling for the estimation of interconnections between the P cycle and soil properties. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 109, n. 2, p. 193–207, 1 nov. 2017.

SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. Reactions of Phosphate Fertilizers in Soils. *In: ASA, CSSA, and SSSA Books*. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1980. p. 263–310.

SANTORO, Veronica; SCHIAVON, Michela; CELI, Luisella. Role of soil abiotic processes on phosphorus availability and plant responses with a focus on strigolactones in tomato plants. **Plant and Soil**, v. 494, n. 1, p. 1–49, 1 jan. 2024.

SANTOS, Danilo Rheinheimer dos; GATIBONI, Luciano Colpo; KAMINSKI, João. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 576–586, abr. 2008.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília-DF: EMBRAPA, 2025.

SANTOS, José Zilton Lopes *et al.* Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 705–714, abr. 2008.

SARKAR, Abhijit *et al.* Polymer coated novel controlled release rock phosphate formulations for improving phosphorus use efficiency by wheat in an Inceptisol. **Soil and Tillage Research**, v. 180, p. 48–62, ago. 2018.

SATO, Shinjiro *et al.* Biogenic calcium phosphate transformation in soils over millennial time scales. **Journal of Soils and Sediments**, v. 9, n. 3, p. 194–205, jun. 2009.

SCHOLZ, Roland W. *et al.* The dynamics of increasing mineral resources and improving resource efficiency: Prospects for mid- and long-term security of phosphorus supply. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 213, p. 107993, 1 fev. 2025.

SCHREIBER, James B. *et al.* Reporting Structural Equation Modeling and Confirmatory Factor Analysis Results: A Review. **The Journal of Educational Research**, v. 99, n. 6, p. 323–338, 1 jul. 2006.

SHEN, Jianbo *et al.* Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997–1005, jul. 2011.

SHEN, Jianbo *et al.* Innovations of phosphorus sustainability: implications for the whole chain. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 6, n. 4, p. 321, 2019.

SHIGAKI, Francirose. **Transporte de fósforo na enxurrada superficial em função do tipo de fonte de P e intensidade das chuvas: Relevância à gerência ambiental em sistemas de produção brasileiros**. Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 1 set. 2006.

SHREVE, Randolph Norris; BRINK, Joseph A. **Indústrias de processos químicos**. 4. ed ed. Rio de Janeiro (RJ): Guanabara, 1997.

SILVA, Erika Caitano da. **Modelagem de equações estruturais no ciclo do fósforo no solo e estratégias de aquisição em solos de diferentes pedogêneses**. Campus Goytacazes-RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2021.

SILVA, Edson Cabral Da *et al.* Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 353–362, 2005.

SILVA, F. C. **Manual De Análises Químicas De Solos, Plantas E Fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

SOUSA, Djalma Martinhão Gomes de; LOBATO, Edson. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília-DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004.

SOUZA, A. E.; FONSECA, D. S. **Fosfato**. Brasília: DNPM, , 2017.

SOUZA FILHO, Luiz Francisco da Silva. **Formas de fósforo em Latossolo sob Cerrado em função do tempo de uso agrícola**. tese de doutorado—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.

SOUZA JÚNIOR, Reginaldo Fidelis De *et al.* Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 159–170, fev. 2012.

SPARKS, Donald L. Environmental Soil Chemistry: An Overview. *In*: SPARKS, Donald L. (Org.). **Environmental Soil Chemistry (Second Edition)**. Burlington: Academic Press, 2003. p. 1–42.

SPOHN, Marie; KUZYAKOV, Yakov. Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 61, p. 69–75, jun. 2013.

STAUFFER E *et al.* **Enhanced efficiency phosphate fertilizers and phosphorus availability in Acrudox**. Disponível em: <<https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.338268665037949>>. Acesso em: 5 jun. 2023.

SUGIHARA, Soh *et al.* Soil phosphorus of stable fraction differentially associate with carbon in the tropical forest and savanna of eastern Cameroon. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 63, n. 6, p. 616–627, 2 nov. 2017.

SYERS, John K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, Denis. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008.

TAKAHASHI, Shigeru; ANWAR, Muhuddin R. Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. **Field Crops Research**, v. 101, n. 2, p. 160–171, mar. 2007.

TANG, Zhi *et al.* Mechanisms and Implications of Phosphate Retention in Soils: Insights from Batch Adsorption Experiments and Geochemical Modeling. **Water**, v. 17, n. 7, p. 998, 28 mar. 2025.

TEIXEIRA, Rafael da Silva *et al.* Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 16, n. 4, p. 1097–1112, 2016.

TIAN, Huixia *et al.* Structural Equation Modeling of Phosphorus Transformations in Soils of *Larix principis-rupprechtii* Mayr. Plantations. **Forests**, v. 14, n. 9, p. 1811, set. 2023.

TIECHER, Tales *et al.* Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 271–282, fev. 2012.

TIECHER, Tales *et al.* Cover Crops Affecting Soil Phosphorus Dynamic in Brazilian Highly Weathered Soils. *In*: REUTER, Jonah (Ed.). **Cover Crops: Cultivation, Management and Benefits**. Hauppauge, New York: Nova Science Publishers Inc, 2016.

TIESSEN, H.; MOIR, J. O. Characterization of Available P by Sequential Extraction. *In*: CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G. (Eds.). **Soil Sampling and Methods of Analysis**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. p. 293–306.

TIESSEN, Holm. Phosphorus Dynamics in Tropical Soils. *In*: THOMAS SIMS, J.; SHARPLEY, Andrew N. (Orgs.). **Agronomy Monographs**. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 2005. p. 253–262.

TOKURA, Alessandra Mayumi *et al.* Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 1, p. 9–16, 2007.

TOKURA, Alessandra Mayumi *et al.* Dinâmica das formas de fósforo em solos de textura e mineralogia contrastantes cultivados com arroz. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 171–179, 2011.

TURNER, Benjamin L.; HAYGARTH, Philip M. Phosphorus solubilization in rewetted soils. **Nature**, v. 411, n. 6835, p. 258, 2001.

VAN KAUWENBERGH, S. J. **World Phosphate Rock Reserves and Resources**. Muscle Shoals: IFDC, 2010.

VIANA, Selma Ferreira *et al.* Variabilidade espacial dos atributos químicos em terra preta de índio cultivada na região de Novo Aripuanã, AM. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 3, p. 53–58, 14 ago. 2016.

VIANA, Tarciana de Oliveira. **Frações de fósforo sob diferentes usos e classes de solo na região sul da Bahia**. Tese de doutorado—Campos dos Goytacazes - RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2016.

VIEIRA, Nilson Darlan. **Resposta da soja a fontes e doses de fósforo em solos com diferentes teores de argila**.

VOGEL, Christian *et al.* Uranium and thorium species in phosphate rock and sewage sludge ash based phosphorus fertilizers. **Journal of Hazardous Materials**, v. 382, p. 121100, jan. 2020.

VOLF, Marcelo R.; ROSOLEM, Ciro A. Soil P Diffusion and Availability Modified by Controlled-Release P Fertilizers. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 1, p. 162–172, 1 mar. 2021.

WALKER, T. W.; SYERS, J. K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, v. 15, n. 1, p. 1–19, 1976.

WANG, Yuan *et al.* Soil phosphorus availability and fractionation in response to different phosphorus sources in alkaline and acid soils: a short-term incubation study. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 5677, 7 abr. 2023.

WEIL, Ray R.; BRADY, Nyle C. **The nature and properties of soils**. Fifteenth edition, global edition ed. Harlow, England London New York: Pearson, 2017.

WITHERS, Paul J. A. *et al.* Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 2537, 7 fev. 2018.

WRIGHT, Sewall. The Method of Path Coefficients. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 5, n. 3, p. 161–215, 1934.

WU, Ping *et al.* A scientometric review of biochar research in the past 20 years (1998–2018). **Biochar** **2019** **1:1**, v. 1, n. 1, p. 23–43, 27 mar. 2019.

YI, Chenxu *et al.* Speciation of Iron and Aluminum in Relation to Phosphorus Sorption and Supply Characteristics of Soil Aggregates in Subtropical Forests. **Forests**, v. 14, n. 9, p. 1804, 4 set. 2023.

ZAMUNER, E. C.; PICONE, L. I.; ECHEVERRIA, H. E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. **Soil and Tillage Research**, v. 99, n. 2, p. 131–138, 2008.

ZAPATA, F.; ROY, R. N. **Use of phosphate rocks for sustainable agriculture**. Rome: FAO, 2004.

ZHANG, Hongzhi; SHI, Leilei; FU, Shenglei. Effects of nitrogen deposition and increased precipitation on soil phosphorus dynamics in a temperate forest. **Geoderma**, v. 380, p. 114650, 2020.

ZHANG, Shugang *et al.* Biowaste-derived, nanohybrid-reinforced double-function slow-release fertilizer with metal-adsorptive function. **Chemical Engineering Journal**, v. 450, p. 138084, 2022.

ZHAO, Wenfei *et al.* Novel Weighting Method for Evaluating Forest Soil Fertility Index: A Structural Equation Model. **Plants**, v. 12, n. 2, p. 410, 15 jan. 2023.

ZHU, Jing; LI, Min; WHELAN, Mick. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. **Science of The Total Environment**, v. 612, p. 522–537, 15 jan. 2018.

## 5. CAPÍTULO III

### De frações lábeis a recalcitrantes: dinâmica do fósforo em um Neossolo Quartzarênico sob fertilização fosfatada e aditivos

#### **Resumo:**

A baixa capacidade tampão e a reduzida fração coloidal dos Neossolos Quartzarênicos, resultantes da elevada proporção de areia e da mineralogia dominada por caulinita e hematita, tornam esses ambientes altamente suscetíveis à lixiviação e à rápida imobilização do fósforo (P). Neste estudo, avaliou-se a dinâmica das frações de P em um Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) submetido à aplicação de fertilizantes fosfatados e aditivos. O experimento foi conduzido em blocos ao acaso, em esquema fatorial  $2 \times 3 + 1$ , com duas fontes de P – monoamônio fosfato (MAP) e superfosfato triplo (ST) – associadas ou não aos aditivos KimcoatBioHP® e IFCoat, além de um tratamento controle. As frações de P inorgânico e orgânico foram determinadas pelo método de fracionamento sequencial de Hedley em cinco períodos de incubação (30, 90, 180, 270 e 360 dias). Os resultados mostraram que a baixa CTC e a mineralogia do RQo favoreceram a rápida conversão das formas lábeis em compartimentos menos disponíveis, como Pi-Fe+Al e Pi-ocluso. O MAP proporcionou maior solubilização inicial, seguida de intensa fixação com Fe e Al, enquanto o ST apresentou liberação mais gradual e maior persistência de Pi-solução e Pi-lábil quando associado aos aditivos. O KimcoatBioHP® destacou-se em combinação com o MAP, elevando as frações lábeis e Po-lábil, enquanto o IFCoat, aplicado com ST, retardou a fixação e sustentou o acúmulo de Pi-lábil até 270 dias. Aos 360 dias, predominou a estabilização em formas recalcitrantes (Pi-ocluso e Po-NLábil), acompanhada pela redução de Po-mic. De modo geral, o manejo mais eficiente para o RQo envolve o uso de MAP com KimcoatBioHP® para rápida disponibilidade de P, ou de ST com IFCoat para prolongar a liberação e reduzir as perdas por fixação, configurando um manejo inteligente e adaptado às limitações químicas e físicas desse solo arenoso.

**Palavras-chave:** eficiência de fertilizantes; solos arenosos; aditivos de revestimento; fracionamento de fósforo; retenção do fósforo.

#### **Abstract:**

The low buffering capacity and reduced colloidal fraction of Quartzipsamments (RQo), resulting from their high sand content and mineralogy dominated by kaolinite and hematite, make these soils highly susceptible to nutrient leaching and rapid phosphorus (P) immobilization. This study evaluated the dynamics of P fractions in a Typic Quartzipsamment (RQo) subjected to the application of phosphate fertilizers and

additives. The experiment followed a randomized block design in a  $2 \times 3 + 1$  factorial scheme, with two P sources – monoammonium phosphate (MAP) and triple superphosphate (TSP) – applied with or without the additives KimcoatBioHP<sup>®</sup> and IFCoat, in addition to a control treatment. Inorganic and organic P fractions were determined by the Hedley sequential fractionation method at five incubation periods (30, 90, 180, 270, and 360 days). Results showed that the low cation exchange capacity (CEC) and mineralogy of the RQo favored the rapid conversion of labile P forms into less available compartments such as Pi-Fe+Al and Pi-occluded. The MAP treatment promoted greater initial solubilization followed by strong fixation with Fe and Al, whereas TSP exhibited a slower and more sustained release, maintaining higher levels of Pi-solution and Pi-labile when combined with additives. KimcoatBioHP<sup>®</sup> performed best when applied with MAP, increasing labile and Po-labile fractions, while IFCoat, in combination with TSP, delayed fixation and sustained Pi-labile accumulation up to 270 days. By 360 days, stabilization in recalcitrant forms (Pi-occluded and Po-NLabile) was predominant, accompanied by a decline in Po-microbial. Overall, the most efficient P management strategy for RQo involves using MAP with KimcoatBioHP<sup>®</sup> to enhance short-term P availability, or TSP with IFCoat to prolong nutrient release and reduce fixation losses. This intelligent management approach aligns P dynamics with the physical and chemical constraints of sandy tropical soils, improving agronomic efficiency and sustainability.

**Keywords:** fertilizer efficiency; sandy soils; coating additives; phosphorus fractionation; phosphorus retention.

## 5.1 Introdução

A baixa disponibilidade de fósforo (P) em solos tropicais constitui um dos principais fatores limitantes à produtividade agrícola, devido à elevada capacidade desses solos em adsorver e imobilizar o nutriente em formas pouco acessíveis às plantas (Alleoni *et al.*, 2016; Novais; Smyth, 1999; Pavinato *et al.*, 2020). A dinâmica do P é fortemente condicionada pela mineralogia, acidez e baixa capacidade tampão dos solos altamente intemperizados, nos quais predomina a rápida transformação de formas lábeis em compartimentos menos disponíveis, resultando em baixa eficiência de uso do nutriente (Barrow, 2017; Havlin, 2017; Weil; Brady, 2017).

Entre os solos de ocorrência significativa em ambientes tropicais, os Neossolos Quartzarênicos (RQo) destacam-se pela elevada proporção de areia, reduzida fração coloidal e baixa capacidade de troca catiônica (CTC), características que aumentam a mobilidade e favorecem perdas por lixiviação (Alleoni *et al.*, 2016; Pessoa-De-Souza *et al.*, 2015). A mineralogia desses solos é dominada por caulinita e hematita, minerais de baixa reatividade superficial, que reduz o potencial de retenção do P em formas moderadamente disponíveis e intensifica a conversão direta para frações não lábeis e ocluídas (Calheiros *et al.*, 2012; Novais; Smyth, 1999). Tais atributos tornam a eficiência

do fertilizante fosfatado ainda mais dependente de estratégias de manejo capazes de prolongar a permanência do P em formas biodisponíveis.

Nesse contexto, o uso de fertilizantes fosfatados associados a aditivos de revestimento tem sido proposto como alternativa para aumentar a eficiência do P. Fertilizantes como o monoamônio fosfato (MAP) e o superfosfato triplo (ST) diferem em solubilidade e mecanismos de liberação, influenciando a disponibilidade inicial e a posterior fixação do nutriente (Reetz Jr, 2016; Volf; Rosolem, 2021). Aditivos como polímeros e substâncias húmicas, a exemplo do KimcoatBioHP<sup>®</sup> e do IFCoat (produto teste), podem modular a dissolução dos fertilizantes, reduzir processos de adsorção e favorecer maior sincronismo entre oferta de P e demanda biológica (Chagas *et al.*, 2015; Guelfi *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022). Contudo, a interação entre aditivos, fontes fosfatadas e atributos edáficos, como a baixa CTC e a mineralogia pouco reativa do RQo, ainda é pouco compreendida, exigindo investigações que integrem frações inorgânicas e orgânicas do fósforo.

Este estudo teve como objetivo avaliar a dinâmica das frações de P em um Neossolo Quartzarênico órtico típico submetido à aplicação de fontes fosfatadas (MAP e ST) e aditivos de revestimento (KimcoatBioHP<sup>®</sup> e IFCoat), utilizando o fracionamento sequencial de Hedley *et al.* (1982), em que o fósforo em solução foi determinado por extração com cloreto de amônio (NH<sub>4</sub>Cl), conforme os procedimentos descritos por Gatiboni *et al.* (2013), ao longo de cinco períodos de incubação.

## 5.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação nas dependências do Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, durante 360 dias. O solo utilizado foi classificado como Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) (Santos *et al.*, 2025), com amostras coletadas em profundidade correspondente ao horizonte diagnóstico C<sub>2</sub>. As características granulométricas e mineralógicas são apresentadas na Tabela 1.

As amostras de solo foram secas ao ar, peneiradas (< 2 mm) e caracterizadas quimicamente quanto a pH-H<sub>2</sub>O, pH-KCl, pH-CaCl<sub>2</sub>, P disponível (Mehlich I), P-remanescente (P-rem), K trocável (Mehlich I), Ca, Mg Al trocáveis (KCl), H+Al (Acetato de Cálcio) e matéria orgânica (MO) (Silva, 2009). Com base nos resultados foram estimados os valores de ΔpH, CTC potencial (T), saturação de bases (V%) e alumínio (m%) (Tabela 2).

**Tabela 1.** Caracterização granulométrica e mineralógica dos horizontes superficiais do Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo)<sup>1</sup>.

Características		
Solo	-	RQo
Cidade/Estado	-	Itarumã-GO
Coordenadas	-	18°35'08" S 51°07'18" W
Horizonte	-	C2
Profundidade	m	1,50 a 2,30
Areia	g kg <sup>-1</sup>	848
Silte	g kg <sup>-1</sup>	12
Argila	g kg <sup>-1</sup>	140
SiO <sub>2</sub>	g kg <sup>-1</sup>	39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	g kg <sup>-1</sup>	34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	g kg <sup>-1</sup>	25
Ki <sup>*</sup>	-	1,95
Kr <sup>**</sup>	-	1,33
$\frac{Al_2O_3^{4***}}{Fe_2O_3}$		2,14
Mineralogia da fração Argila <sup>2</sup>	-	Ct, Hm e indícios de Ve

<sup>1</sup>(Santos *et al.*, 2018); \*Ki = %SiO<sub>2</sub> x 1,7 / %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; \*\*Kr = [(%SiO<sub>2</sub> x 1,7) / %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>] + (%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> x 0,64);

\*\*\*  $\frac{Al_2O_3^3}{Fe_2O_3} = Al_2O_3 \times 1,57 / Fe_2O_3$  e <sup>2</sup>Difratometria de Raio X; Ct = Caulinita; Hm = Hematita; Ve = Vermiculita.

A correção da acidez foi realizada com hidróxido de cálcio p.a. [Ca(OH)<sub>2</sub>] (PM 74,09 g mol<sup>-1</sup>), incorporado ao solo de modo a elevar a saturação de cálcio (Ca<sup>2+</sup>) na CTC potencial para 55,21%, valor definido com base na saturação natural observada em Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe) avaliado em experimento paralelo, que serviu como referência de equilíbrio químico entre os solos. O corretivo foi homogeneamente misturado ao solo e mantido em incubação por 30 dias, com umidade controlada (60% do volume de poros preenchidos com água), visando estabilizar o pH e o balanço de cátions antes da aplicação dos tratamentos.

**Tabela 2.** Caracterização química das subamostras dos solos Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo).

Características	Unidade	Valor
pH H <sub>2</sub> O	-	3,58
pH CaCl <sub>2</sub>	-	3,95
pH KCl	-	3,87
ΔpH	-	0,29
P – M1	mg dm <sup>-3</sup>	2,57
P-rem	mg dm <sup>-3</sup>	60,00
Pi <sup>1</sup> -solução	mg dm <sup>-3</sup>	2,78
Pi-Lábil	mg dm <sup>-3</sup>	13,79
Po <sup>2</sup> -Lábil	mg dm <sup>-3</sup>	192,51
Po-microbiano	mg dm <sup>-3</sup>	4,85
Pi-Não Lábil	mg dm <sup>-3</sup>	8,58
Po-Não Lábil	mg dm <sup>-3</sup>	74,75
Pi-Fe+Al	mg dm <sup>-3</sup>	48,26
Po-Recalcitrante	mg dm <sup>-3</sup>	73,49
Pi-Ca	mg dm <sup>-3</sup>	10,24
K	mg dm <sup>-3</sup>	5,00
Ca	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,83
Mg	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,49
Al	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,44
H+Al	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	3,60
Soma de Bases (SB)	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	1,33
CTC pH 7,0 (T)	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	4,93
Saturação de Bases (V)	%	27,0
Saturação de alumínio (m)	%	24,9
<b>Matéria Orgânica do Solo (M.O.)</b>	<b>g dm<sup>-3</sup></b>	<b>9,7</b>

<sup>1</sup>Pi – Fósforo na fração inorgânica; <sup>2</sup>Po – fósforo na fração orgânica do solo.

### 5.2.1 Determinação da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP)

Após a calagem, foram coletadas subamostras para a estimativa da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP), segundo metodologia descrita por Fonseca *et al.* (1988) e Alvarez *et al.* (2000). Foram utilizados 2,5 cm<sup>3</sup> de terra fina seca ao ar (TFSA) de cada repetição, em pH natural, dispersos em 25 mL de solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> contendo fósforo (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) nas concentrações de 0, 2, 4, 10, 20, 40, 60, 80, 100 e 120 mg L<sup>-1</sup> de P. As suspensões foram agitadas horizontalmente por 24 horas em temperatura ambiente, centrifugadas a 4 000 g por 10 minutos, e o fósforo remanescente na solução foi determinado pelo método colorimétrico do ácido ascórbico (Murphy; Riley, 1962).

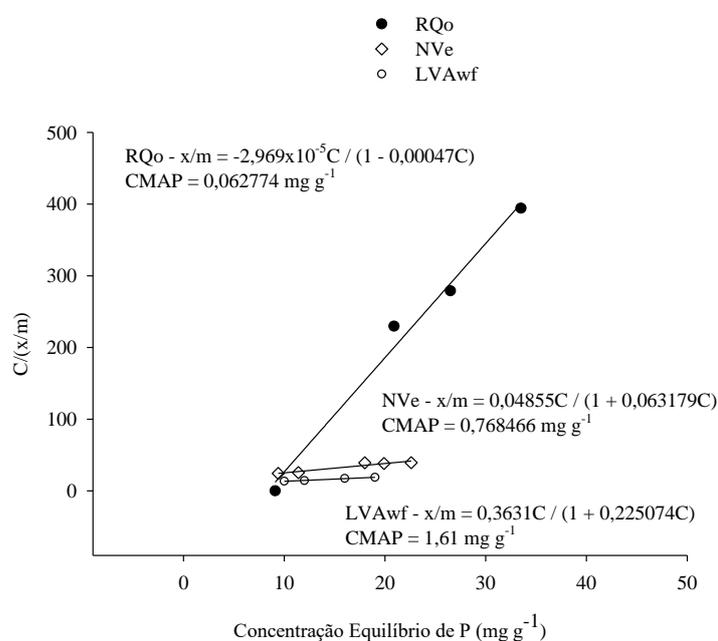
A quantidade de fósforo adsorvido (q, mg g<sup>-1</sup> de solo) foi obtida pela diferença entre o P adicionado e o P remanescente na solução de equilíbrio. Os dados foram ajustados à isoterma de Langmuir (1918), na forma linearizada:

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{ab} + \frac{C}{b}$$

em que C é a concentração de P em equilíbrio ( $\text{mg L}^{-1}$ ), a é a constante relacionada à energia de ligação e b é a capacidade máxima de adsorção (CMAP).

As doses de fósforo aplicadas nos experimentos foram estimadas conforme a metodologia proposta por Alvarez V. & Fonseca (1990), que define critérios para a determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. Para o Neossolo Quartzarênico Órtico típico (RQo), a dose de fósforo utilizada foi de  $100 \text{ mg dm}^{-3}$  de P, valor adequado à baixa capacidade de adsorção e à reduzida fração coloidal desse solo arenoso.

As quantidades de fertilizante foram ajustadas segundo os teores de P nas fontes, de modo a garantir equivalência no aporte de P e permitir a comparação entre as fontes e os aditivos avaliados. O monoamônio fosfato (MAP) contém 51% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (22,3% de P) e 11% de  $\text{N-NH}_4^+$ , enquanto o superfosfato triplo (ST) apresenta 46% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (20,1% de P) e 10% de Ca. Assim, para a dose de  $100 \text{ mg dm}^{-3}$  de P utilizada no RQo, foram aplicados  $0,45 \text{ g kg}^{-1}$  de MAP e  $0,50 \text{ g kg}^{-1}$  de ST (valores ajustados conforme o teor de P em cada fonte).



**Figura 1.** Representação gráfica da forma linear da isoterma de Langmuir, das equações hiperbólicas e dos valores estimados da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP,  $\text{mg P g}^{-1}$  de solo) para o Neossolo Quartzarênico Órtico típico (RQo), Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe) e Latossolo Vermelho-Amarelo acriférrico (LVAwf).

### 5.2.2 Delineamento experimental e manejo

O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso, em esquema fatorial  $2 \times 3 + 1$ , composto por duas fontes de fósforo (MAP e ST), três condições de aditivos (sem aditivo, KimcoatBioHP<sup>®</sup> e IFCoat) e um tratamento controle (sem aplicação de P e aditivos), com quatro repetições.

O KimcoatBioHP<sup>®</sup> é um revestimento polimérico composto por 50% CaCO<sub>3</sub>, 16% Ca, além de polímeros e substâncias húmicas, enquanto o IFCoat, é um aditivo teste, consiste em polímero de liberação controlada desenvolvido para retardar a solubilização do fertilizante e reduzir as perdas por fixação.

As unidades experimentais foram compostas por vasos de polietileno de 3 dm<sup>3</sup>, contendo 1,5 kg de solo seco ao ar. A temperatura foi mantida perto de 30°C, e a umidade do solo foi controlada por pesagem dos vasos para reposição da água evapotranspirada.

Durante os primeiros 180 dias, a pesagem e reposição de água foram realizadas diariamente, mantendo o teor de umidade próximo a 60% do volume de poros preenchidos com água. Nos 180 dias seguintes, o controle foi feito a cada 30 dias, simulando ciclos de umedecimento e secagem equivalentes a um ciclo agrícola anual.

### 5.2.3 Amostragem e fracionamento do fósforo

As amostras de solo foram obtidas após a homogeneização do solo de cada unidade experimental, aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após a instalação do experimento (DAI). Posteriormente, foram secas ao ar, peneiradas (< 2 mm) e acondicionadas em sacos devidamente identificados. Para o fracionamento do fósforo, utilizaram 10 g de solo, na proporção de 1:3 (solo:solução extratora).

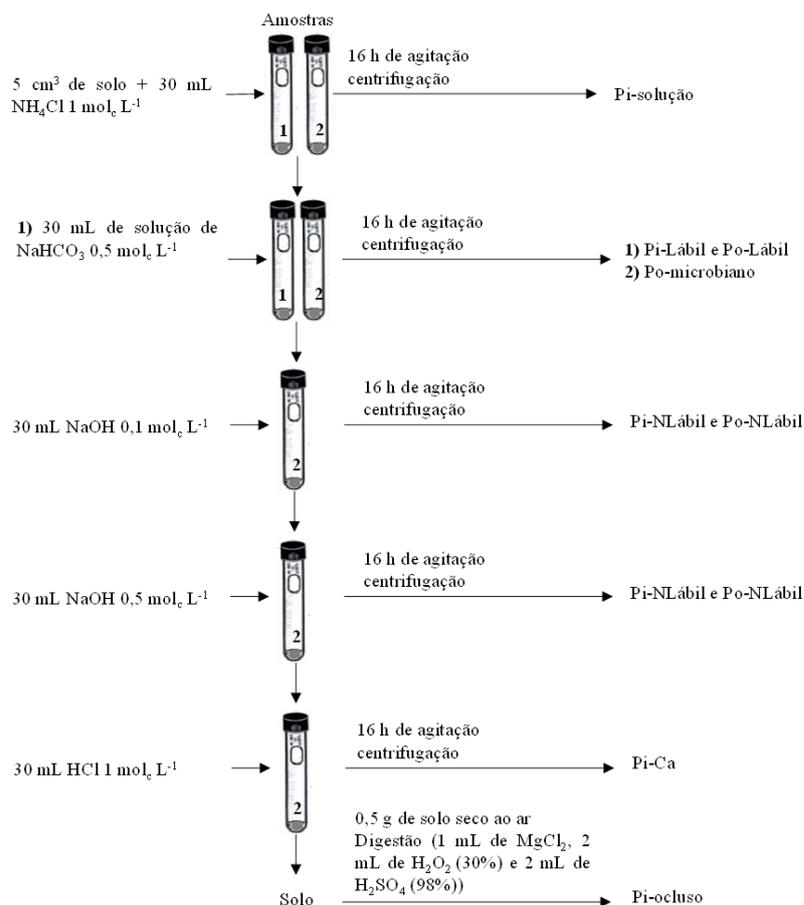
O fósforo em solução (Pi-solução) foi determinado por extração com cloreto de amônio (NH<sub>4</sub>Cl) 1 mol L<sup>-1</sup> (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013), e as demais frações foram obtidas segundo o método sequencial de Hedley (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982) (Figura 2). Após cada extração, adicionaram 25 mL de NaCl 1 mol L<sup>-1</sup>, seguidos de agitação a 200 rpm por 5 minutos e centrifugação a 4 000 g por 5 minutos, descartando o sobrenadante para reduzir interferência de Ca e evitar superestimação das frações orgânicas lábil (Po-Lábil) e a pouco a moderadamente lábil (Po-NLábil).

A superestimação das frações Po-Lábil e Po-NLábil ocorre pela precipitação de Ca com o ânion fosfato em meio acidificado pela adição do ácido sulfúrico utilizado para precipitar os compostos orgânicos obtidos na extração com bicarbonato de sódio

( $\text{NaHCO}_3$ ) e hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) a 0,5 e 1 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013).

As frações inorgânicas do P no solo foram classificadas em: P extraído pelo  $\text{NH}_4\text{Cl}$  1 mol L<sup>-1</sup> como P em solução (Pi-solução); P extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup> em P inorgânico lábil (Pi-Lábil); P extraído pelo  $\text{NaOH}$  0,1 mol L<sup>-1</sup> equivalente ao P inorgânico precipitado com Fe e Al na solução do solo (Pi Fe+Al) (Costa *et al.*, 2016; Cross; Schlesinger, 1995; Klotzbücher *et al.*, 2019; Luo; Yuan; Huang, 2024; Mirabello *et al.*, 2013; Redel *et al.*, 2016); P extraído pelo  $\text{NaOH}$  0,5 mol L<sup>-1</sup> equivalente ao P inorgânico não lábil (Pi-NLábil); P extraído pelo  $\text{HCl}$  1 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> em P inorgânico precipitado com Ca de diferentes espécies iônicas (Pi-Ca) e o P extraído por digestão sulfúrica,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 65% (1:1 v/v solo : solução extratora) em P inorgânico ocluso e pequenas frações de P precipitado com Ca não extraídos pelo  $\text{HCl}$  (Pi-occluso).

As frações orgânicas foram classificadas em: P orgânico microbiano, que equivale ao P na biomassa microbiana viva, extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup> + clorofórmio ( $\text{CHCl}_3$ ) em P orgânico microbiano (Po-mic); P extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup> em P orgânico lábil (Po-Lábil); P orgânico extraído pelo  $\text{NaOH}$  a 0,1 mol L<sup>-1</sup> em P orgânico moderadamente lábil (Po-MLábil) e P orgânico extraído pelo  $\text{NaOH}$  a 0,5 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> em P orgânico não lábil (Po-NLábil).



**Figura 2.** Esquema do fracionamento do fósforo no solo de acordo com o método (Hedley; Stewart; Chauhan, 1982) com modificações e correlação das frações com as formas do fósforo no solo (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013). Fonte: Adaptado de (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013).

#### 5.2.4 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste de média (Scott Knott 5% de prob.). Quando ajustados modelos matemáticos para as respostas dos tratamentos, foi realizada a análise de identidade dos modelos para cada variável. As análises estatísticas foram realizadas no R (R Core Team, 2021) utilizando os pacotes ExpDes.pt (Ferreira; Cavalcanti; Nogueira, 2021) e FactoMineR (Lê; Josse; Husson, 2008). Além disso, foi realizada uma análise de correlação de *Pearson* ( $r$ ) entre as frações de P ( $p < 0,01$  e  $0,05$ ).

#### 5.3 Resultado e Discussão

Os Neossolos Quartzarênicos caracterizam-se por textura arenosa, baixa CTC e reduzida fração coloidal, condições que limitam a capacidade tampão e favorecem a lixiviação de nutrientes (Alleoni *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2018). Nessas condições, o fósforo (P) aplicado via fertilizantes apresenta elevada suscetibilidade à imobilização, já

que a fração em solução representa menos de 0,1% do P total em solos tropicais (Novais; Smyth, 1999).

Aos 30 dias após a incubação (DAI) no Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo), o P inorgânico em solução do solo (Pi-solução) foi influenciado pelos fertilizantes, aditivos e pela interação entre ambos, havendo diferença entre tratamento fatorial e controle (Tabela 3). Com destaque para o monoamônio fosfato (MAP) aplicado com aditivos, KimcoatBioHP® e IFCoat, superando MAP sem aditivo, superfosfato triplo (ST) com os mesmos aditivos e o tratamento controle (Figura 3A). Refletindo a maior solubilidade do MAP e a contribuição dos aditivos em retardar a imobilização do P.

Em contraste, o ST, independentemente do uso de aditivos, não elevou o Pi-solução (Figura 3A). Possivelmente, por causa da menor solubilidade em ambientes de baixa saturação por  $\text{Ca}^{2+}$  e da rápida precipitação com  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ , intensificada pela formação de microambientes ácidos ao redor dos grânulos (Haynes; Mokolobate, 2001; Novais; Smyth, 1999; Penn; Camberato, 2019). A presença de hematita, altamente reativa, reforça a adsorção específica de fosfato, enquanto a predominância de caulinita e a baixa CTC conferem reduzido fator capacidade ou poder tampão, dificultando a manutenção do P em solução (Alleoni *et al.*, 2016; Parfitt, 1978; Pavinato *et al.*, 2020). O que pode ser verificado ao longo do experimento, em que a fração de P em solução do solo, mesmo influenciada pelos tratamentos, mostrou-se estável ao longo do experimento, entre 1,13 e 2,73  $\text{mg kg}^{-1}$  (Tabela 3 e Figuras 3A, 3D, 3G, 3J e 3M).

A dinâmica do P resultou em acúmulo nas frações menos disponíveis. O fósforo inorgânico lábil (Pi-Lábil), fração associada ao fator quantidade de P (Q) e importante na reposição do Pi-solução (Costa *et al.*, 2024; Novais; Smyth, 1999), apresentou baixos teores médios, embora tenha sido influenciada tanto pela aplicação de aditivos quanto pela interação entre fertilizantes e aditivos (Tabela 3). Além de ter aumentado em todos os tratamentos fatoriais em comparação ao tratamento controle (Figura 3B).

No caso do MAP, a aplicação com os aditivos resultou nos maiores teores de Pi-Lábil, com destaque para a o aditivo KimcoatBioHP®, que foi estatisticamente superior à combinação com IFCoat e ambas superando a aplicação de MAP sem adição de aditivos (Figura 3B). Para o ST, não foram observadas diferenças significativas entre as aplicações com ou sem aditivos para o Pi-Lábil (Figura 3B). Além disso, na comparação entre as fontes para cada aditivo, MAP com KimcoatBioHP® superou ST com KimcoatBioHP®, assim como, ST sem aditivos superou MAP sem aditivos (Figura 3B).

Esse padrão sugere que, embora os aditivos tenham favorecido inicialmente o acúmulo de formas lábeis, a rápida mobilidade do P em um solo arenoso como o RQo intensificou a adsorção e o subsequente acúmulo em frações menos reversíveis, como Pi-NLábil e Pi-ocluso aos 30 DAI (Tabela 3; Figuras 3C e 4A). Essa interpretação é sustentada pelos coeficientes de correlação significativos entre Pi-sol, Pi-NLábil e Pi-ocluso (Tabela 4), que indicam a rápida transição do fósforo da solução para compartimentos de menor disponibilidade.

Na fração de fósforo inorgânico não lábil (Pi-NLábil), aos 30 DAI, houve efeito significativo de fertilizantes, aditivos e da interação entre ambos, com diferença em relação ao controle (Tabela 3). Contudo, apenas MAP com KimcoatBioHP<sup>®</sup> promoveu incremento expressivo dessa fração em comparação aos demais tratamentos (Figura 3C), indicando rápida adsorção do P liberado. Esse processo esteve associado ao aumento da fração oclusa de P (Pi-ocluso), também influenciado por fertilizantes e aditivos, embora sem interação significativa (Tabela 3). Ainda assim, efeitos pontuais foram verificados para a fonte MAP e para o aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup> em comparação ao tratamento controle, com maiores valores da fração de Pi-ocluso para o solo tratado (Figura 4A).

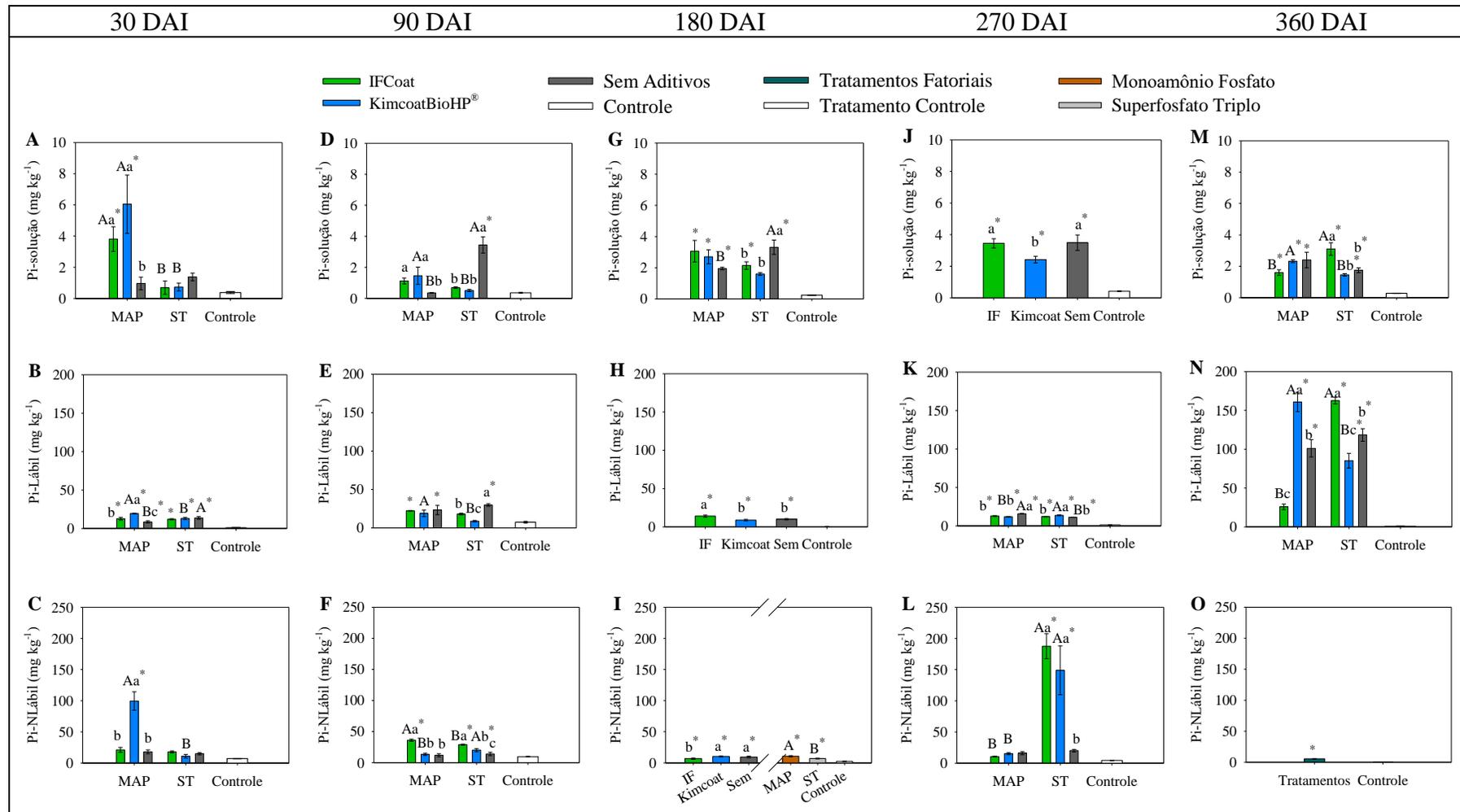
O fertilizante MAP resultou em maior oclusão de P em relação ao ST, enquanto o aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup> apresentou maior valor, superando o aditivo IFCoat e a ausência de aditivo (Figura 4A). Reforçando que a alta mobilidade do P em solos arenosos como o RQo favorece a redistribuição no perfil e a subsequente oclusão (Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008; Souza Júnior *et al.*, 2012; Weil; Brady, 2017).

**Tabela 3.** Análise de variância das frações de P no Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI).

Fontes de Variação	Fertilizantes (F)	Aditivo (A)	F vs. A	Adicional vs. Fatorial	CV(%)	Média ± erro
<b>30 DAI</b>						
Pi-solução	17,01**	3,90*	6,65**	4,86*	79,20	2,00 ± 0,46
Pi-Lábil	0,43 <sup>ns</sup>	10,41**	11,92**	91,91**	20,68	11,39 ± 1,08
Pi-NLábil	40,97**	25,27**	33,37**	12,73**	44,69	27,09 ± 6,10
Pi-ocluso	9,47**	13,06**	3,10 <sup>ns</sup>	2,85 <sup>ns</sup>	15,77	500,62 ± 23,27
Pi-Fe+Al	0,03 <sup>ns</sup>	6,38**	21,80**	18,30**	44,98	25,35 ± 4,06
Pi-Ca	0,95 <sup>ns</sup>	1,64 <sup>ns</sup>	1,00 <sup>ns</sup>	1,63 <sup>ns</sup>	90,05	2,07 ± 0,36
Po-Lábil	297,98**	425,46**	373,38**	237,68**	14,01	1,92 ± 0,45
Po-mic	95,36**	67,75**	67,98**	15,33**	37,67	3,22 ± 0,89
Po-MLábil	0,0 <sup>ns</sup>	0,0 <sup>ns</sup>	0,0 <sup>ns</sup>	0,0 <sup>ns</sup>	-	0,0 ± 0,0
Po-NLábil	0,03 <sup>ns</sup>	3,91*	0,01 <sup>ns</sup>	2,94 <sup>ns</sup>	125,97	5,12 ± 1,32
<b>90 DAI</b>						
Pi-sol	5,29*	6,62**	26,48**	7,68*	53,25	1,13 ± 0,22
Pi-Lábil	1,19 <sup>ns</sup>	9,37**	4,12*	16,21**	31,98	18,34 ± 1,72
Pi-NLábil	0,13 <sup>ns</sup>	59,02**	6,87**	29,15**	19,96	19,19 ± 1,88
Pi-ocluso	15,72**	0,04 <sup>ns</sup>	1,55 <sup>ns</sup>	6,82*	15,28	127,60 ± 4,85
Pi-Fe+Al	10,61**	0,14 <sup>ns</sup>	36,42**	51,22**	26,64	26,96 ± 3,26
Pi-Ca	74,24**	26,59**	10,04**	0,06 <sup>ns</sup>	33,49	0,12 ± 0,02
Po-Lábil	0,79 <sup>ns</sup>	2,88 <sup>ns</sup>	12,52**	6,19*	86,82	2,75 ± 0,67
Po-mic	20,05**	18,06**	6,83**	26,25**	30,87	36,97 ± 4,49
Po-MLábil	37,24**	37,24**	37,24**	5,32*	93,66	0,57 ± 0,28
Po-NLábil	0,01 <sup>ns</sup>	5,98**	1,62 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	45,39	23,90 ± 2,37
<b>180 DAI</b>						
Pi-sol	0,56 <sup>ns</sup>	1,05 <sup>ns</sup>	6,78**	30,41**	34,74	2,14 ± 0,22
Pi-Lábil	0,00 <sup>ns</sup>	8,34**	3,13 <sup>ns</sup>	52,86**	29,21	9,35 ± 0,98
Pi-NLábil	13,47**	4,63*	0,41 <sup>ns</sup>	23,72**	30,52	7,94 ± 0,73
Pi-ocluso	13,36**	16,49**	2,35 <sup>ns</sup>	6,05*	7,41	130,02 ± 3,10
Pi-Fe+Al	0,08 <sup>ns</sup>	4,01*	4,53*	79,27**	21,41	63,01 ± 5,32
Pi-Ca	21,49**	26,42**	11,36**	11,14**	54,30	1,42 ± 0,32

Fontes de Variação	Fertilizantes (F)	Aditivo (A)	F vs. A	Adicional vs. Fatorial	CV(%)	Média ± erro
<b>Continuação 180 DAI</b>						
Po-Lábil	30,00**	14,95**	8,50**	16,68**	39,89	4,54 ± 0,71
Po-mic	14,00**	10,58**	4,84*	1,10 <sup>ns</sup>	45,03	7,80 ± 1,04
Po-MLábil	0,00 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	592,87**	53,23	0,25 ± 0,12
Po-NLábil	0,00 <sup>ns</sup>	1,84 <sup>ns</sup>	10,46**	22,53**	33,52	122,53 ± 12,33
<b>270 DAI</b>						
Pi-sol	0,36 <sup>ns</sup>	3,78*	2,62 <sup>ns</sup>	31,98**	32,31	2,73 ± 0,26
Pi-Lábil	10,48**	3,13 <sup>ns</sup>	29,12**	645,35**	7,60	11,22 ± 0,84
Pi-NLábil	59,61**	13,20**	14,61**	11,94**	57,83	57,55 ± 14,73
Pi-ocluso	8,86**	1,60 <sup>ns</sup>	1,18 <sup>ns</sup>	13,46**	6,49	117,00 ± 1,93
Pi-Fe+Al	5,77*	0,33 <sup>ns</sup>	37,73**	40,78**	29,94	49,72 ± 6,49
Pi-Ca	0,72 <sup>ns</sup>	1,04 <sup>ns</sup>	4,69*	26,43**	22,82	1,99 ± 0,13
Po-Lábil	1,19 <sup>ns</sup>	5,63*	26,81**	22,91**	36,05	7,80 ± 1,07
Po-mic	26,58**	5,27*	15,96**	39,13**	34,54	9,17 ± 1,31
Po-MLábil	0,13 <sup>ns</sup>	3,85*	32,94**	23,17**	36,41	34,57 ± 4,97
Po-NLábil	104,49**	24,56**	24,56**	14,93**	55,91	1,09 ± 0,34
<b>360 DAI</b>						
Pi-sol	0,00 <sup>ns</sup>	1,57 <sup>ns</sup>	12,63**	42,05**	28,28	1,84 ± 0,18
Pi-Lábil	15,55**	6,27**	85,64**	151,57**	17,39	93,47 ± 11,40
Pi-NLábil	1,39 <sup>ns</sup>	0,76 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	54,86**	26,67	5,37 ± 0,46
Pi-ocluso	4,42*	6,71**	0,84 <sup>ns</sup>	1,08 <sup>ns</sup>	12,55	612,74 ± 18,04
Pi-Fe+Al	3,97 <sup>ns</sup>	0,38 <sup>ns</sup>	2,80 <sup>ns</sup>	74,43**	20,49	59,80 ± 4,58
Pi-Ca	0,41 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	1,34 <sup>ns</sup>	7,15*	33,84	2,67 ± 0,18
Po-Lábil	0,0 <sup>ns</sup>	0,0 <sup>ns</sup>	0,0 <sup>ns</sup>	1896,64**	29,76	0,22 ± 0,10
Po-mic	27,27**	10,68**	10,43**	5,43*	92,65	2,41 ± 0,80
Po-MLábil	0,0 <sup>ns</sup>	0,0 <sup>ns</sup>	0,0 <sup>ns</sup>	149,39**	106,05	0,37 ± 0,18
Po-NLábil	7,44*	6,99**	17,36**	10,59**	71,60	3,12 ± 0,76

<sup>ns</sup>, \*\*, \* = não significativo, significativo a 1% e 5%; Pi-solução = P inorgânico em solução (P<sub>NH<sub>4</sub>Cl-1,0</sub>); Pi-Lábil = P inorgânico lábil (P<sub>BIC</sub>); Pi-NLábil P inorgânico não lábil (P<sub>HID-0,5</sub>); Pi.ocluso = P inorgânico ocluso ou P residual (P<sub>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></sub>); Pi-Fe+Al P inorgânico precipitado com Fe e Al (P<sub>HID1,0</sub>); P inorgânico precipitado com cálcio (P<sub>HCl1,0</sub>); Po-Lábil = P orgânico lábil (P<sub>BIC</sub>); Po-mic = P na biomassa microbiana viva (P<sub>BIC+CHCl<sub>3</sub></sub>); Po.MLábil = P orgânico moderadamente lábil (P<sub>HID-0,1</sub>); Po-NLábil = P orgânico não lábil (P<sub>HID-0,5</sub>); Fertilizantes (F) = MAP (fosfato monoamônio – NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) e ST (superfosfato triplo (Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>)); Aditivos (A) = KimcoatBioHP®, IFCoat e sem aditivos; F vs. A = interação; Adicional vs. Fatorial = interação; CV (%) = coeficiente de variação; Média ± erro = média e erro do tratamento fatorial.



**Figura 3.** Frações de fósforo em um Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). Fósforo inorgânico em solução (Pi-solução), fósforo inorgânico lábil (Pi-Lábil) e fósforo inorgânico não lábil (Pi-NLábil), em mg kg<sup>-1</sup>.

O P precipitado com óxidos e hidróxidos de Fe e Al (Pi-Fe+Al) alterou com aditivos e com a interação entre esse e os fertilizantes, aos 30 DAI (Tabela 3). Com diferença entre fatorial em controle (Tabela 3). No MAP a maior concentração foi observada para IFCoat, seguido de KimcoatBioHP<sup>®</sup> e MAP sem aditivo (Figura 4B). Para o ST, entretanto, a ausência de aditivo resultou em maior valor de Pi-Fe+Al, em comparação ao uso de aditivos (Figura 4B).

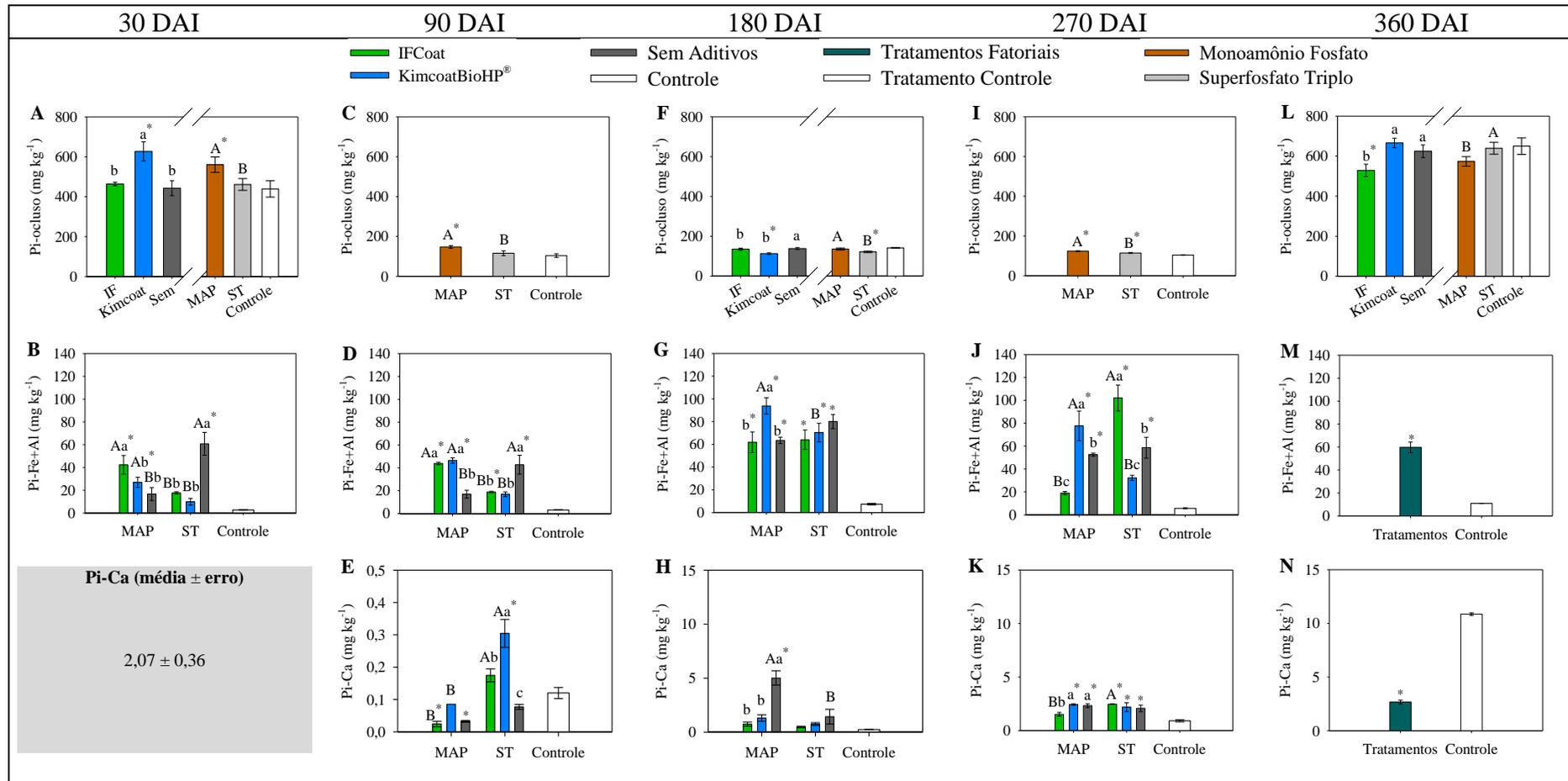
Comparando fontes, ST sem aditivos superou MAP sem aditivos, mas na presença de aditivos, tanto IFCoat como KimcoatBioHP<sup>®</sup>, o MAP apresentou maiores valores que o ST (Figura 4B). Em relação ao controle, os maiores valores foram observados para MAP com aditivos, IFCoat e KimcoatBioHP<sup>®</sup>, e para ST sem aditivo (Figura 4B). Esses resultados sugerem que, embora não tenha correlação significativa entre Pi-solução e Pi-Fe+Al (Tabela 4), a rápida liberação de P pelo MAP, especialmente com IFCoat, favoreceu a precipitação em óxidos de Fe e Al.

Por outro lado, o Pi-Ca não foi influenciado por fertilizantes, aditivos ou pela interação entre ambos, além de não diferir do controle (Tabela 3). Essa ausência de resposta está associada ao pH ácido e a baixa saturação por bases do RQo, que limitam a formação de compostos de P com cálcio e direcionam o nutriente para processos de adsorção ou precipitação (Alleoni *et al.*, 2016; Novais; Smyth, 1999).

Aos 30 DAI, a fração orgânica lábil de P (Po-Lábil) foi influenciada pela aplicação de fertilizantes, aditivos e pela interação entre ambos, havendo diferença entre fatorial e controle (Tabela 3). O maior acúmulo dessa fração foi observado na combinação de MAP com o aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup>, que superou a aplicação de MAP sem aditivo e ambos superando a aplicação de MAP com o aditivo IFCoat (Figura 5A). Já para o ST, a ausência de aditivos resultou em maior Po-lábil (Figura 5A). A comparação entre fontes indicou que o MAP com KimcoatBioHP<sup>®</sup> promoveu maior formação de Po-Lábil em comparação ao ST com o mesmo aditivo, enquanto o ST sem aditivos gerou valores superiores ao MAP sem aditivos (Figura 5A). Além disso, apenas os tratamentos MAP com KimcoatBioHP<sup>®</sup>, MAP sem aditivos e ST sem aditivos apresentaram valores superiores ao controle (Figura 5A).

**Tabela 4:** Coeficientes de correlação entre as frações inorgânicas e orgânicas de fósforo em um Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) incubado com MAP e ST com e sem aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 DAI.

Coeficientes de Correlação (r)									
	Pi-Lábil	Pi-NLábil	Pi-ocluso	Pi-Fe+Al	Pi-Ca	Po-Lábil	Po-mic	Po-Mlábil	Po-Nlábil
30 DAI									
Pi-sol	0,60**	0,79**	0,51**	0,27 <sup>ns</sup>	0,48**	0,48**	0,36 <sup>ns</sup>	--	-0,04 <sup>ns</sup>
Pi-Lábil		0,61**	0,45*	0,42*	0,46*	0,51**	0,13 <sup>ns</sup>	--	0,06 <sup>ns</sup>
Pi-Nlábil			0,67**	0,09 <sup>ns</sup>	0,25 <sup>ns</sup>	0,71**	0,05 <sup>ns</sup>	--	-0,14 <sup>ns</sup>
Pi-ocluso				-0,20 <sup>ns</sup>	0,16 <sup>ns</sup>	0,42*	-0,00 <sup>ns</sup>	--	-0,21 <sup>ns</sup>
Pi-Fe+Al					0,22 <sup>ns</sup>	0,36 <sup>ns</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	--	0,18 <sup>ns</sup>
Pi-Ca						0,04 <sup>ns</sup>	0,25 <sup>ns</sup>	--	-0,14 <sup>ns</sup>
Po-Lábil							-0,28 <sup>ns</sup>	--	-0,16 <sup>ns</sup>
Po-mic								--	0,28 <sup>ns</sup>
Po-Mlábil								--	--
90 DAI									
Pi-sol	0,50**	-0,08 <sup>ns</sup>	-0,07 <sup>ns</sup>	0,65**	-0,23 <sup>ns</sup>	0,48**	0,12 <sup>ns</sup>	-0,026 <sup>ns</sup>	-0,01 <sup>ns</sup>
Pi-Lábil		0,10 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	0,57**	-0,50**	0,43*	0,30 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>
Pi-Nlábil			0,26 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	0,44*	0,69**	-0,24 <sup>ns</sup>	0,57**
Pi-ocluso				0,43*	-0,25 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	0,42*	0,39*	0,28 <sup>ns</sup>
Pi-Fe+Al					-0,038*	0,61**	0,65**	-0,23 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>
Pi-Ca						-0,37 <sup>ns</sup>	-0,16 <sup>ns</sup>	-0,34 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>
Po-Lábil							0,52**	-0,31 <sup>ns</sup>	0,27 <sup>ns</sup>
Po-mic								-0,21 <sup>ns</sup>	0,35 <sup>ns</sup>
Po-Mlábil									-0,17 <sup>ns</sup>
180 DAI									
Pi-sol	0,82**	0,42*	-0,10 <sup>ns</sup>	0,70**	0,21 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>	-0,05 <sup>ns</sup>	-0,66**	0,69**
Pi-Lábil		0,31 <sup>ns</sup>	-0,13 <sup>ns</sup>	0,70**	0,10 <sup>ns</sup>	0,50**	-0,22 <sup>ns</sup>	-0,72**	0,69**
Pi-Nlábil			-0,16 <sup>ns</sup>	0,54**	0,57**	0,31 <sup>ns</sup>	0,69**	-0,58**	0,38*
Pi-ocluso				-0,43*	0,29 <sup>ns</sup>	0,22 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	0,27 <sup>ns</sup>	-0,44*
Pi-Fe+Al					0,20 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	-0,81**	0,87**
Pi-Ca						0,19 <sup>ns</sup>	0,62**	-0,29 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>
Po-Lábil							-0,09 <sup>ns</sup>	-0,38*	0,14 <sup>ns</sup>
Po-mic								-0,12 <sup>ns</sup>	-0,02 <sup>ns</sup>
Po-Mlábil									-0,57**
270 DAI									
Pi-sol	0,54**	0,12 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,52**	0,58**	0,64**	0,35 <sup>ns</sup>	0,59**	0,12 <sup>ns</sup>
Pi-Lábil		0,27 <sup>ns</sup>	0,62**	0,39*	0,60**	0,28 <sup>ns</sup>	0,53**	0,20 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>ns</sup>
Pi-Nlábil			-0,02 <sup>ns</sup>	0,42*	0,34 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	-0,43*	-0,20 <sup>ns</sup>	-0,34 <sup>ns</sup>
Pi-ocluso				0,13 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	-0,06 <sup>ns</sup>	0,34 <sup>ns</sup>	-0,07 <sup>ns</sup>	0,52**
Pi-Fe+Al					0,70**	0,65**	-0,04 <sup>ns</sup>	0,35 <sup>ns</sup>	0,28 <sup>ns</sup>
Pi-Ca						0,41*	0,27 <sup>ns</sup>	0,28 <sup>ns</sup>	0,35 <sup>ns</sup>
Po-Lábil							0,19 <sup>ns</sup>	0,67**	0,19 <sup>ns</sup>
Po-mic								0,53**	0,34 <sup>ns</sup>
Po-Mlábil									0,13 <sup>ns</sup>
360 DAI									
Pi-sol	0,77**	0,64**	-0,18 <sup>ns</sup>	0,80**	0,37 <sup>ns</sup>	-0,67**	-0,00 <sup>ns</sup>	-0,63**	-0,52**
Pi-Lábil		0,61**	0,13 <sup>ns</sup>	0,65**	0,48**	-0,63**	-0,22 <sup>ns</sup>	-0,60**	-0,53**
Pi-Nlábil			-0,02 <sup>ns</sup>	0,69**	0,45*	-0,83**	0,01 <sup>ns</sup>	-0,78**	-0,30 <sup>ns</sup>
Pi-ocluso				-0,27 <sup>ns</sup>	0,25 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	-0,35 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>
Pi-Fe+Al					0,31 <sup>ns</sup>	-0,83**	0,30 <sup>ns</sup>	-0,78**	-0,41*
Pi-Ca						-0,51**	-0,09 <sup>ns</sup>	-0,55**	-0,36 <sup>ns</sup>
Po-Lábil							-0,24 <sup>ns</sup>	0,96**	0,35 <sup>ns</sup>
Po-mic								-0,22 <sup>ns</sup>	-0,08 <sup>ns</sup>
Po-Mlábil									0,35 <sup>ns</sup>

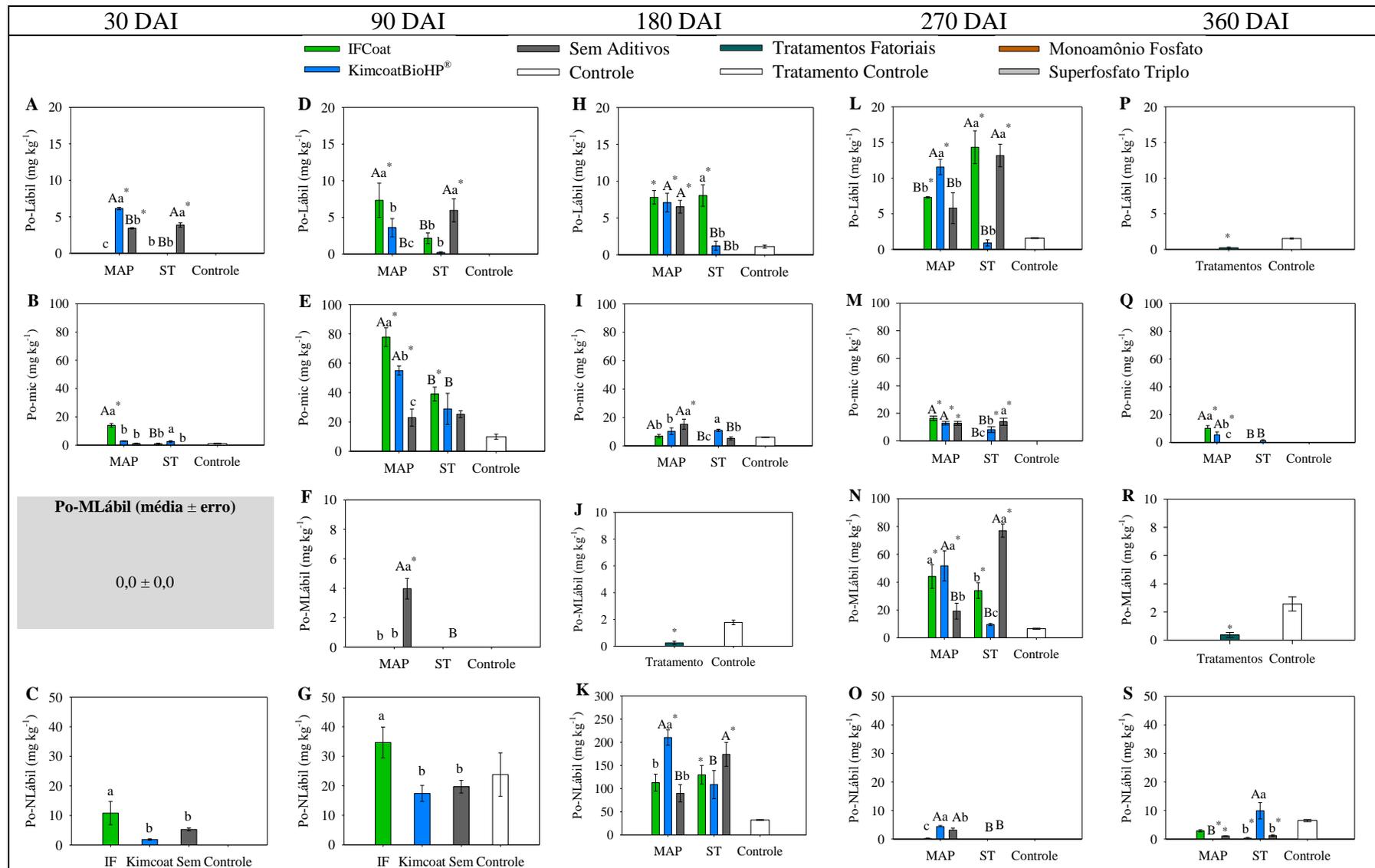


**Figura 4.** Frações de fósforo em um Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação (DAI). Fósforo inorgânico ocluído (Pi-occluso), fósforo inorgânico precipitado com Fe<sup>3+</sup> e Al<sup>3+</sup> livres em solução (Pi-Fe+Al) e fósforo inorgânico precipitado com Ca<sup>2+</sup> (Pi-Ca), em mg kg<sup>-1</sup>.

Provavelmente, a cinética de liberação do P, modulada pela fonte e pelo aditivo, afeta diretamente a formação de formas orgânicas lábeis, corroborada pela correlação positiva de Po-Lábil com Pi-solução e Pi-Lábil (Tabela 4). Sugerindo estreita conexão entre as formas inorgânicas e orgânicas do P, em que picos de disponibilidade inicial de P, como observados no tratamento MAP com o aditivo KimcoatBioHP® (Figura 3A), podem tanto intensificar processos de adsorção e oclusão (Figuras 3C e 4A) quanto estimular a conversão em formas orgânicas lábeis (Figura 5A), dependente da dinâmica microbiana local e das características físico-químicas do solo.

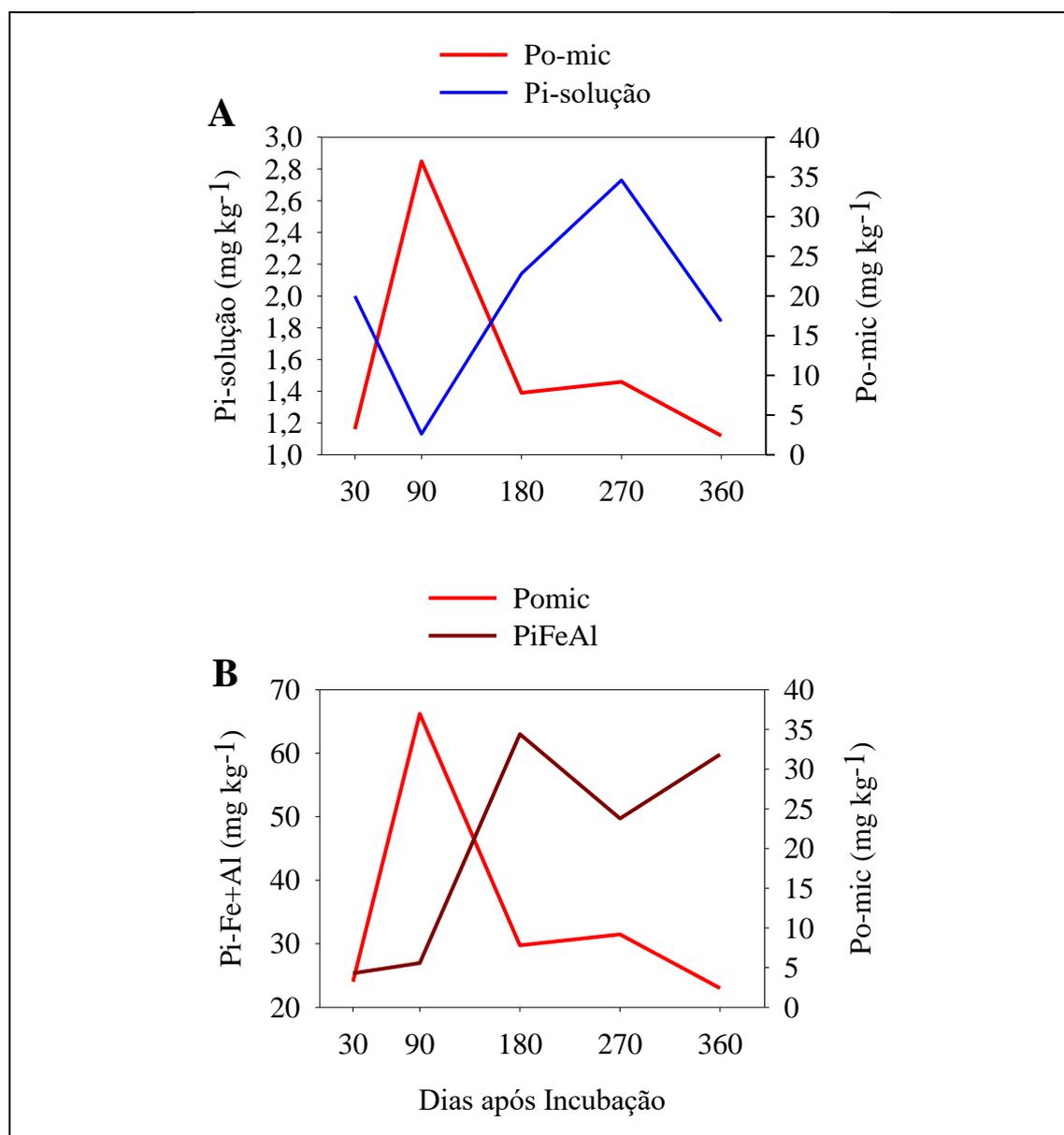
Nesse mesmo período, a fração de fósforo orgânico microbiano (Po-mic) também foi alterada pela aplicação de fertilizantes, aditivos e pela interação desses fatores, apresentando diferença entre tratamento fatorial e controle (Tabela 3). O tratamento com MAP associado ao aditivo IFCoat apresentou o maior acúmulo dessa fração em comparação ao KimcoatBioHP® e sem aditivos (Figura 5B). Para o ST, o maior valor de Po-mic foi observado na aplicação com KimcoatBioHP® (Figura 5B). O MAP com IFCoat, além de ser a única combinação que diferiu do tratamento controle, resultou em maiores valores de Po-mic do que a aplicação de ST com o mesmo aditivo (Figura 5B). O Po-mic atua como reservatório transitório de P, sensível à dinâmica microbiana e à cinética de liberação das fontes (Audette *et al.*, 2020; Bai *et al.*, 2020; He *et al.*, 2023; Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000; Spohn; Kuzyakov, 2013). O acúmulo em MAP com IFCoat indica retenção biológica temporária do nutriente, com potencial de suprimento futuro às plantas, ao passo que o padrão observado em ST com KimcoatBioHP® sugere assimilação microbiana mais gradual.

Embora não tenham sido observadas correlações significativas entre Po-mic e Pi-solução aos 30 DAI (Tabela 4), a avaliação temporal sugeriu um padrão inverso entre essas frações (Figura 6A). Entre 30 e 180 DAI, o aumento do Po-mic coincidiu com a redução do Pi-solução, seguido do processo oposto após 180 dias. Esse comportamento indica que o P liberado em solução foi inicialmente imobilizado pela biomassa microbiana, mas, com a redução da atividade dos microrganismos, parte desse P retornou à solução. Tal retorno é consistente com as correlações positivas entre Pi-solução e Pi-Fe+Al observadas ao longo do tempo (Tabela 4), sugerindo que o P remobilizado passou a interagir com os óxidos de Fe e Al, intensificando os processos de precipitação (Figura 6B). A ausência de correlações significativas entre Po-mic e Pi-Fe+Al reforça, entretanto, que a fração microbiana apresenta comportamento mais autônomo, determinado pela dinâmica biológica do solo.



**Figura 5.** Frações de fósforo em um Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) em função dos fertilizantes e aditivos aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após a incubação (DAI). Fósforo orgânico lábil (Po-lábil), fósforo microbiano (Po-mic) e fósforo orgânico moderadamente lábil (Po-MLábil), em mg kg<sup>-1</sup>.

Aos 30 DAI, não foram detectadas quantidades mensuráveis de fósforo orgânico moderadamente lábil (Po-MLábil) em nenhum tratamento (Tabela 3). Essa ausência indica que, sob as condições de baixa argilosidade e reduzido teor de matéria orgânica do RQo, o P liberado foi rapidamente mineralizado ou convertido em formas mais estáveis, impedindo o acúmulo de compostos intermediários (Condrón; Newman, 2011; Gatiboni *et al.*, 2007). A análise de correlação de Pearson confirma esse comportamento transitório, uma vez que o Po-MLábil não apresentou associação significativa com as demais frações (Tabela 4).



**Figura 6.** Relação entre os valores médios de Po-mic com Pi-solução (A) e com Pi-Fe+Al (B) em um Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) dos 30 aos 360 dias de incubação com MAP, ST com e sem tratamento com aditivos.

Aos 30 DAI, a fração de fósforo orgânico não lábil (Po-NLábil), considerada de maior estabilidade, apresentou variação significativa apenas em função dos aditivos (Tabela 3). O tratamento com IFCoat destacou-se com valores médios superiores aos obtidos com KimcoatBioHP® e sem aditivos (Figura 5C). Esse resultado sugere que parte do P assimilado pelas vias biológicas foi rapidamente estabilizada em formas orgânicas recalcitrantes, especialmente sob a liberação controlada proporcionada pelo IFCoat. O Po-NLábil não apresentou correlação significativa com nenhuma fração (Tabela 4), reforçando que a formação decorre de processos específicos de estabilização microbiana (Bai *et al.*, 2020), relativamente independentes da dinâmica imediata do P solúvel ou lábil.

De forma geral, aos 30 DAI a dinâmica do fósforo orgânico no RQo foi modulada pela fonte e pelo tipo de aditivo. O MAP favoreceu a formação de frações microbianas e lábeis, enquanto o IFCoat promoveu maior estabilização em formas não lábeis, e o KimcoatBioHP® apresentou comportamento intermediário. A ausência de Po-MLábil e a independência estatística do Po-NLábil reforçam que frações orgânicas mais estáveis seguem trajetórias próprias, determinadas por processos biológicos e pelas limitações químicas do solo.

Aos 90 DAI, a fração Pi-solução foi influenciada por todos os fatores e pelas interações, além de haver diferença entre esses e o controle (Tabela 3). No MAP, os aditivos IFCoat e KimcoatBioHP® resultaram em maiores valores em relação ao fertilizante sem aditivo (Figura 3D), confirmando o padrão já observado aos 30 dias e reforçando o potencial dos aditivos em prolongar a liberação de P desta fonte. Em contraste, o ST apresentou comportamento distinto, em que a ausência de aditivos levou ao maior valor de Pi-solução, desta vez superando as combinações com IFCoat e KimcoatBioHP® (Figura 3D). Além disso, apenas ST sem aditivo diferiu do controle, destacando-se como o tratamento mais eficiente nesse período. Esse resultado sugere que, embora a dissolução do ST seja mais lenta, a liberação intensificou-se ao longo do tempo, enquanto a associação com aditivos pode ter favorecido a formação de fosfatos de cálcio pouco solúveis. Dessa forma, ST sem aditivos levou ao aumento de Pi-solução em relação ao MAP, assim como, ST com KimcoatBioHP® reduziu essa fração em relação ao MAP com KimcoatBioHP® (Figura 3D).

De forma complementar, a fração Pi-Lábil também foi influenciada pelos aditivos e pela interação com fertilizantes, com diferença entre fatorial e controle (Tabela 3). No MAP, não houve diferenças entre adições ou não de aditivos, enquanto no ST a ausência de aditivos resultou nos maiores valores. Além disso, ST com KimcoatBioHP®

reduziu o Pi-Lábil em relação ao MAP com o mesmo aditivo (Figura 3E). A correlação negativa entre Pi-Lábil e Pi-Ca (Tabela 4) indica que a aplicação de ST com aditivos favoreceu a precipitação de fosfatos de cálcio, reduzindo a disponibilidade imediata de P. A correlação positiva com Po-Lábil evidencia ainda a estreita conexão entre as formas inorgânicas e orgânicas de maior mobilidade no solo.

Quando esses resultados são comparados com os dados obtidos aos 30 DAI, nota-se mudança importante na dinâmica do P. Na fase inicial, os tratamentos com MAP, especialmente em combinação com KimcoatBioHP<sup>®</sup>, apresentaram maiores valores de Pi-solução e de Pi-Lábil, refletindo a rápida liberação e conversão do P aplicado em formas disponíveis. Entretanto, aos 90 DAI, algumas dessas combinações passaram a apresentar teores de Pi-Lábil semelhantes aos do controle, como no caso de MAP com o aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup>, ST com os aditivos IFCoat e KimcoatBioHP<sup>®</sup> (Figura 3E). Isso indica que parte do fósforo anteriormente disponível pode ter sido adsorvida, precipitada ou incorporada às formas menos acessíveis com o passar do tempo.

O Pi-NLábil também apresentou variação significativa pela aplicação de aditivos e as interações com as fontes, apresentando diferença entre fatorial e controle aos 90 DAI (Tabela 3). No MAP, o IFCoat promoveu maior acúmulo, diferindo do controle, além das aplicações dessa mesma fonte com KimcoatBioHP<sup>®</sup> e na ausência de aditivo (Figura 3F). No ST, o IFCoat também resultou em maior acúmulo, seguido por KimcoatBioHP<sup>®</sup> e ambos, além de diferir do ST sem aditivo, levaram à maiores valores que o tratamento controle (Figura 3F). Ao comparar cada aditivos entre as fontes, o MAP associado ao IFCoat resultou no maior acúmulo de Pi-NLábil que ST com IFCoat. Por outro lado, a aplicação de ST com KimcoatBioHP<sup>®</sup> promoveu acúmulo superior de Pi-NLábil quando comparado ao MAP com o mesmo aditivo (Figura 3E). Enquanto, na ausência de aditivos, não houve diferenças significativas entre as fontes (Figura 3E).

Esses resultados indicam que a modulação do Pi-NLábil depende fortemente da interação entre fonte e aditivo, refletindo processos distintos de transformação do P no sistema solo (Chagas *et al.*, 2015; Guelfi *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022). O maior acúmulo observado com MAP com IFCoat sugere que a alta solubilidade inicial do MAP, aliada à liberação gradual do aditivo, favoreceu a conversão do P aplicado em formas menos lábeis ao longo do tempo (Alleoni *et al.*, 2016; Pavinato *et al.*, 2020). Já no ST, a menor solubilidade da fonte, combinada à ação do KimcoatBioHP<sup>®</sup>, pode ter atenuado a fixação imediata do nutriente, promovendo liberação mais gradual e acúmulo posterior em formas não lábeis (Havlin, 2017; Novais; Smyth; Nunes, 2007). Em solos arenosos

como o RQo, de baixa capacidade tampão e reduzida fração coloidal, tais interações são cruciais para compreender a eficiência do uso de fertilizantes fosfatados, pois determinam não apenas a disponibilidade imediata do nutriente, mas também a persistência no perfil do solo. Nesse contexto, as correlações observadas aos 90 DAI de Pi-NLábil com Po-mic e com Po-NLábil (Tabela 4) reforçam que parte do P inicialmente disponível pode ter sido incorporada à biomassa microbiana ou estabilizada em compostos orgânicos recalcitrantes (Bai *et al.*, 2020; Conte; Anghinoni; Rheinheimer, 2002; Gatiboni *et al.*, 2007). Assim, o Pi-NLábil confirma seu papel como uma fração de transição, influenciada tanto pela dinâmica inorgânica quanto pela orgânica, especialmente em solos arenosos de baixa capacidade tampão como o RQo.

Para o Pi-ocluso, apenas os fertilizantes influenciaram os resultados, além de diferir do controle (Tabela 3). O MAP apresentou maior acúmulo em comparação ao ST e ao controle (Figura 4C), provavelmente por causa da maior solubilidade, sugerindo que parte do P aplicado pode tornar-se menos acessível mesmo em solos com baixa capacidade tampão, como é o caso RQo. Entretanto, entre 30 e 90 dias houve redução dessa fração, de 500,62 para 127,60 mg kg<sup>-1</sup> (Tabela 3), ainda representativa para um solo arenoso. Além disso, as correlações com as frações Pi-Fe+Al, Po-mic e com Po-MLábil (Tabela 4) indicam que a transformação esteve associada tanto a processos inorgânicos de interação com óxidos de Fe e Al quanto à dinâmica microbiana (Bai *et al.*, 2020; Gatiboni *et al.*, 2007; Guelfi *et al.*, 2022).

A fração Pi-Fe+Al também foi influenciada significativamente pelos fertilizantes e pela interação destes com os aditivos, aos 90 DAI, com diferença entre fatorial e controle (Tabela 3). Para o MAP, os maiores valores ocorreram nas combinações com KimcoatBioHP<sup>®</sup> e IFCoat, superiores ao MAP sem aditivo e ao tratamento controle (Figura 4D). Para o ST, o maior valor foi obtido sem aditivo, enquanto os aditivos reduziram essa fração (Figura 4D). No entanto, assim com ST sem aditivo, ST com KimcoatBioHP<sup>®</sup> diferiu do controle (Figura 4D).

O maior acúmulo de Pi-Fe+Al em MAP com aditivos, em comparação ao ST com os mesmos aditivos, sugere que a rápida liberação de P do MAP favoreceu a precipitação com óxidos de Fe e Al do solo (Alleoni *et al.*, 2016; Guelfi *et al.*, 2022; Lindsay; Stephenson, 1959). Já no ST, de dissolução mais lenta e rico em cálcio, a ausência de aditivos permitiu maior retenção do P em sítios de alta afinidade, enquanto os aditivos parecem ter modulado negativamente esse processo (Haynes; Mokolobate, 2001; Zhang *et al.*, 2022). A correlação positiva entre Pi-Fe+Al e Pi-Lábil (Tabela 4)

reforça que parte do P inicialmente disponível foi rapidamente retida em formas menos acessíveis, especialmente nas combinações com MAP, em consonância com a forte afinidade do fosfato por óxidos de Fe e Al em solos tropicais altamente intemperizados (Chagas *et al.*, 2015; Parfitt, 1978).

Por fim, em relação as frações inorgânicas aos 90 DAI, a fração Pi-Ca foi afetada por fertilizantes, aditivos e pela interação entre ambos (Tabela 3). No MAP, não houve diferenças entre os tratamentos, mas no ST o KimcoatBioHP® promoveu o maior acúmulo, seguido pelo IFCoat e pela ausência de aditivo (Figura 4E). Comparando as fontes, o ST aplicado com aditivos resultou em maiores valores de Pi-Ca do que o MAP (Figura 4E), evidenciando o papel do cálcio liberado por essa fonte na formação de precipitados de fosfato de cálcio (Barrow, 2017; Sample; Soper; Racz, 1980). A correlação negativa com Pi-Lábil confirma que esse processo reduziu a disponibilidade imediata do P (Tabela 4), ainda que o Pi-Ca possa atuar como reserva temporária, potencialmente biodisponível sob condições edafoclimáticas favoráveis (Havlin, 2017; Pavinato *et al.*, 2020).

Na comparação com o tratamento controle, a aplicação de MAP, tanto com o aditivo IFCoat como sem aditivo apresentaram valores inferiores, enquanto o ST aplicado com KimcoatBioHP® resultou em maior acúmulo de Pi-Ca (Figura 4E). Esse resultado reforça que o fornecimento conjunto de  $\text{Ca}^{2+}$  e P pelo ST favorece a precipitação de fosfatos de cálcio, particularmente na presença de aditivos, ao passo que o MAP, por liberar amônio e não conter cálcio na composição, mostrou-se menos propenso a esse processo (Chagas *et al.*, 2015; Haynes; Mokolobate, 2001). Assim, a compatibilidade entre fonte e aditivo deve ser considerada no manejo da adubação fosfatada em solos arenosos de baixa capacidade tampão, e a formação de Pi-Ca pode representar tanto uma via de imobilização temporária quanto uma reserva de liberação gradual (Guelfi *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022).

Aos 90 DAI, a fração Po-Lábil apresentou interação significativa entre fertilizantes e aditivos, além de haver diferença entre fatorial e controle (Tabela 3). O MAP aplicado com IFCoat destacou-se, além de diferir do tratamento controle, superou o MAP com KimcoatBioHP® e ambos apresentando maiores valores que MAP sem aditivo (Figura 5D). Enquanto no ST os maiores teores ocorreram na ausência de aditivos, inclusive superando o controle (Figura 5D). Além disso, MAP com IFCoat e ST sem aditivo levaram ao maior acúmulo dessa fração quando comparados ao ST com IFCoat e MAP sem aditivos, respectivamente (Figura 5D), sugerindo maior eficiência na formação

de compostos orgânicos lábeis nessas condições. Essa resposta indica que a liberação de P do fertilizante e a ação dos aditivos modulam a mineralização do P orgânico, possivelmente por estímulo microbiano (Bai *et al.*, 2020; Gama-Rodrigues *et al.*, 2014; Turner; Haygarth, 2001). A correlação positiva de Po-Lábil com Pi-Lábil e Pi-Fe+Al (Tabela 4) reforça sua função como elo entre a ciclagem biológica e os processos de imobilização abiótica do P em solos arenosos de baixa CTC.

Nesse mesmo período, a fração Po-mic foi influenciada por fertilizantes, aditivos e pela interação entre ambos, com diferenças também em relação ao controle (Tabela 3). No MAP, o IFCoat promoveu maior acúmulo, seguido por KimcoatBioHP® e pela ausência de aditivo (Figura 5E). No caso do ST, os aditivos não diferiram entre si, mas os teores de Po-mic foram inferiores quando nas aplicações dos aditivos IFCoat e KimcoatBioHP® em comparação ao MAP aplicado com os mesmos aditivos (Figura 5E). Em comparação ao controle, apenas MAP com os aditivos e ST com IFCoat apresentaram incrementos significativos (Figura 5E). Esses resultados reforçam o papel dos aditivos, especialmente do IFCoat, na estimulação da biomassa microbiana e no acúmulo de P em formas transitórias (Audette *et al.*, 2020; He *et al.*, 2023; Spohn; Kuzyakov, 2013).

As correlações positivas entre Po-mic, Pi-Fe+Al e Po-Lábil (Tabela 4) indicam que parte do P imobilizado pela microbiota pode estar associada tanto à formação de complexos organo-minerais com Fe e Al quanto ao retorno de P em formas biodisponíveis por meio de ciclos curtos de absorção e mineralização, demonstrando como essa fração funciona como elo entre o orgânico e o inorgânico (Bai *et al.*, 2020; Condrón; Tiessen, 2005; Turner; Haygarth, 2001). Esse comportamento é típico de solos tropicais ácidos, nos quais a atividade de fosfatases e substâncias húmicas regula a interface entre processos biológicos e abióticos na dinâmica do fósforo (Gama-Rodrigues *et al.*, 2014).

Aos 90 DAI, a fração Po-MLábil respondeu à aplicação dos tratamentos, com interação significativa entre fertilizantes e aditivos e diferença em relação ao controle (Tabela 3). Contudo, apenas o MAP sem aditivos apresentou acúmulo detectável, superando os demais tratamentos fatoriais e o controle (Figura 5F). Esse resultado isolado pode refletir um equilíbrio transitório entre a mineralização de formas lábeis e a estabilização parcial em compostos orgânicos de mobilidade intermediária (Condrón; Newman, 2011; Gatiboni *et al.*, 2007). A correlação positiva com Pi-ocluso (Tabela 4) sugere que a formação dessa fração pode estar associada, em paralelo, ao aprisionamento de P inorgânico em compartimentos de menor disponibilidade.

A fração de Po-NLábil, por sua vez, foi influenciada apenas pela aplicação de aditivos aos 90 DAI (Tabela 3). Assim como aos 30 DAI (Figura 5C), novamente o aditivo IFCoat promoveu o maior acúmulo dessa fração, superando KimcoatBioHP® e a ausência de aditivo (Figura 5G). Esse resultado sugere que o IFCoat pode favorecer a estabilização de compostos orgânicos recalcitrantes, possivelmente via complexação com substâncias húmicas ou subprodutos microbianos (Conte; Anghinoni; Rheinheimer, 2002; Gatiboni *et al.*, 2007). O controle, por sua vez, apresentou valores médios de Po-NLábil semelhantes aos obtidos com IFCoat, KimcoatBioHP® ou na ausência de aditivos, tanto aos 30 quanto aos 90 DAI (Tabela 3; Figuras 5C e 5G). Esse resultado reforça o caráter estável dessa fração, cuja formação está vinculada a processos de complexação coloidal e à incorporação de resíduos microbianos, que demandam maior tempo para responder às alterações na disponibilidade de P (Bai *et al.*, 2020; He *et al.*, 2023; Novais; Smyth; Nunes, 2007).

A correlação positiva entre Po-NLábil e Pi-NLábil (Tabela 4) indica sincronia entre processos de estabilização orgânica e inorgânica, evidenciando que frações pouco disponíveis tendem a acumular-se simultaneamente no solo (Guelfi *et al.*, 2022). Esse acúmulo resulta da complexação com compostos húmicos e da oclusão em minerais, formando pools de P de difícil mineralização ou solubilização (Novais; Smyth; Nunes, 2007; Pavinato *et al.*, 2020).

Aos 180 DAI, a fração de Pi-solução no RQo foi significativamente influenciada pela interação entre fertilizantes e aditivos, com diferença em relação ao controle (Tabela 3), em que somente ST com KimcoatBioHP® não diferiu do tratamento controle (Figura 3G). No MAP, os aditivos IFCoat e KimcoatBioHP® não diferiram entre si nem em relação ao fertilizante sem aditivo (Figura 3G). Já no ST, ambos reduziram os teores de Pi-solução em comparação ao ST sem aditivo, evidenciando que a resposta dos aditivos é dependente da fonte fosfatada (Figura 3G) (Alleoni *et al.*, 2016; Guelfi *et al.*, 2022). Além disso, na ausência de aditivos, o ST apresentou maior valor que o MAP e o controle (Figura 3G), indicando que a dissolução mais lenta, sem barreiras físicas ou químicas, resultou em maior persistência do P em solução. Esse padrão confirma o observado aos 90 DAI, em que o MAP mostrou solubilização inicial acentuada seguida de rápida imobilização, enquanto o ST manteve teores mais estáveis ao longo do tempo.

Esse comportamento reflete as propriedades do RQo, marcado pela baixa capacidade tampão e reduzida atividade de óxidos de Fe e Al, que favorecem a mobilidade, mas limitam a retenção de P em formas biodisponíveis (Nunes; Santos;

Guelfi, 2022; Pavinato *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2018). Nesse contexto, os aditivos modulam a liberação do nutriente, podendo reduzir perdas e prolongar a permanência no sistema. As correlações reforçam essa dinâmica: Pi-solução apresentou associação positiva com Pi-lábil, Pi-Fe+Al e Po-NLábil (Tabela 4), indicando equilíbrio entre formas mais acessíveis e progressiva imobilização em compartimentos inorgânicos e orgânicos estáveis (Bai *et al.*, 2020; Barrow, 2017; Novais; Smyth, 1999). Já a correlação negativa com Po-MLábil (Tabela 4) sugere que essa fração contribuiu para o suprimento das formas inorgânicas disponíveis (Condrón; Newman, 2011).

Aos 180 DAI, a fração Pi-Lábil foi influenciada pela aplicação de aditivos (Tabela 3). O IFCoat proporcionou o maior acúmulo, superando KimcoatBioHP® e a ausência de aditivo (Figura 3H). Ainda assim, independentemente da fonte, todos os tratamentos fatoriais resultaram em teores superiores ao controle (Tabela 3; Figura 3H). Esse efeito indica que a liberação mais gradual proporcionada pelo IFCoat favoreceu a manutenção do P em formas prontamente disponíveis, aspecto particularmente relevante em Neossolos Quartzarênicos, solos arenosos com baixa capacidade tampão e elevada suscetibilidade à lixiviação (Alleoni *et al.*, 2016; Pavinato *et al.*, 2020; Nunes; Santos; Guelfi, 2022). As correlações reforçam essa interpretação. O Pi-Lábil associou-se positivamente a Pi-solução, Pi-Fe+Al e Po-lábil (Tabela 4), confirmando seu papel como elo central entre o P imediatamente disponível e frações orgânicas e inorgânicas mais transientes (Bai *et al.*, 2020; Novais; Smyth, 1999). A correlação negativa com Po-MLábil sugere que a mineralização dessa fração intermediária pode estar contribuindo para o suprimento das formas inorgânicas mais acessíveis (Condrón; Newman, 2011; He *et al.*, 2023). Por outro lado, a correlação positiva com Po-NLábil ( $r = 0,69$ ) indica que, paralelamente, parte do P lábil pode ter sido progressivamente estabilizada em formas orgânicas recalcitrantes, evidenciando a coexistência de processos de mineralização e imobilização ao longo da incubação.

Aos 180 DAI, a fração de Pi-NLábil no RQo foi significativamente influenciada pela aplicação de fertilizantes e de aditivos de forma independente, sem interação entre esses fatores, mas com diferença em relação ao tratamento controle (Tabela 3). O aditivo IFCoat promoveu o menor acúmulo de Pi-NLábil em comparação ao KimcoatBioHP® e à ausência de aditivo (Figura 3I), sugerindo que sua liberação gradual de fósforo reduziu a saturação dos sítios reativos, limitando a fixação imediata em formas menos disponíveis (Figura 3I) (Guelfi *et al.*, 2022; Teixeira *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2022). Em contrapartida, o MAP resultou em maior acúmulo dessa fração que o ST (Figura 3I),

coerente com evidências de que fontes mais solúveis favorecem a rápida conversão do P em formas não lábeis, especialmente em solos tropicais com alta capacidade de adsorção (Reetz Jr, 2016; Volf; Rosolem, 2021).

Esse padrão está associado às características do RQo, em que a quimissorção de fosfato em óxidos de Fe e Al é intensificada (Haynes; Mokolobate, 2001; Novais; Smyth, 1999; Nunes; Santos; Guelfi, 2022; Pessoa-De-Souza *et al.*, 2015). A aplicação de P, independentemente da fonte ou aditivo, intensificou sua conversão em formas de baixa disponibilidade diferente do tratamento controle (Figura 3I), alinhado com a dinâmica de transição entre frações orgânicas e inorgânicas (Freitas, 2013; Oliveira *et al.*, 2021).

A fração de Pi-ocluso apresentou variação significativa aos 180 DAI, influenciada de forma independente por aditivos e fertilizantes (Tabela 3). A aplicação de IFCoat e KimcoatBioHP<sup>®</sup> reduziu a oclusão de P em comparação ao tratamento sem aditivos (Figura 4F), possivelmente por modularem a redistribuição do nutriente antes de sua imobilização definitiva na matriz mineral do solo. De forma consistente com as coletas anteriores (30 e 90 DAI; Figuras 4A e 4D), o MAP resultou em maior acúmulo de Pi-ocluso em relação ao ST (Figura 4F), comportamento associado à alta solubilidade inicial e subsequente retrogradação em solos de baixa capacidade tampão como o RQo (Barrow, 2017; Haynes; Mokolobate, 2001; Novais; Smyth, 1999). No entanto, apenas os tratamentos com KimcoatBioHP<sup>®</sup> e ST diferiram significativamente do controle (Figura 4F), sugerindo que a elevada variabilidade dessa fração pode ter limitado a detecção estatística de diferenças adicionais.

A fração Pi-Fe+Al foi significativamente influenciada pela aplicação de aditivos e pela interação entre fertilizantes e aditivos, além de diferir do controle (Tabela 3). O MAP aplicado com KimcoatBioHP<sup>®</sup> resultou no maior acúmulo dessa fração em comparação ao IFCoat e à ausência de aditivo (Figura 4G). Enquanto ST, que aos 30 e 90 DAI havia promovido os maiores valores de Pi-Fe+Al sem aditivos (Figuras 4B e 4D), aos 180 DAI não diferiu das combinações com aditivos (Figura 4G). Esse comportamento sugere redistribuição do P aplicado, com esgotamento do P mais prontamente disponível e intensificação da imobilização em formas estáveis. De fato, o Pi-Fe+Al aumentou expressivamente aos 180 DAI, em comparação aos 30 e 90 DAI (Tabela 3), confirmando a importância como dreno de P em ambientes de baixa biodisponibilidade.

A fração de Pi-Ca aumentou consideravelmente aos 180 DAI, em comparação aos 90 DAI, sendo influenciada pelos fertilizantes, aditivos e pela interação entre ambos, além de haver diferença do controle (Tabela 3). No caso do MAP, o tratamento sem

aditivos promoveu maior acúmulo de Pi-Ca em relação às combinações com IFCoat e KimcoatBioHP<sup>®</sup>, além de superar os tratamentos com ST sem aditivo (Figura 4H). Esse resultado sugere que a ausência de revestimento favoreceu a precipitação direta do P liberado com cátions divalentes presentes no solo. Apenas o MAP sem aditivo diferiu significativamente do controle (Figura 4H), indicando que a formação desses precipitados foi mais expressiva quando a liberação ocorreu de forma imediata, sem o efeito modulador dos aditivos. Dinâmica consistente com a literatura, que aponta que fontes solúveis liberadas rapidamente podem favorecer a retrogradação em fosfatos de cálcio em solos tropicais (Barrow, 2017; Novais; Smyth, 1999; Sample; Soper; Racz, 1980), ao passo que a modulação promovida por revestimentos pode reduzir a saturação localizada da solução do solo e retardar tais processos (Pavinato *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2022).

Aos 180 DAI, o Po-Lábil foi alterado pela aplicação de fertilizantes, aditivos e pela interação entre ambos (Tabela 3). Para o MAP, não houve diferença entre IFCoat, KimcoatBioHP<sup>®</sup> ou aplicação sem aditivo (Figura 5H), em contraste com fases anteriores (30 DAI: destaque do KimcoatBioHP<sup>®</sup>; 90 DAI: destaque do IFCoat). Já no ST, a ausência de aditivos, que antes resultava nos maiores teores, passou a apresentar os menores valores, superada pela aplicação com IFCoat (Figura 5H). Esse comportamento indica que os efeitos dos aditivos são modulados pela fonte e pelo tempo de incubação, refletindo a dinâmica de transformação do P orgânico lábil (Bai *et al.*, 2020; Novais; Smyth, 1999; Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000).

O Po-mic do RQo em estudo, foi influenciado pela aplicação de fertilizantes, de aditivos e da interação entre esses aos 180 DAI (Tabela 3). Além disso, houve redução expressiva dos valores em comparação aos 90 DAI, de 36,97 para 7,80 mg kg<sup>-1</sup> (Tabela 3), sugerindo mineralização da biomassa ou redistribuição para formas menos disponíveis. No MAP, o maior acúmulo ocorreu na ausência de aditivos, enquanto no ST a associação com KimcoatBioHP<sup>®</sup> resultou nos maiores valores (Figura 5I). Entre fontes, o MAP, tanto sem aditivo quanto com IFCoat, superou o ST nas mesmas condições (Figura 5I). Apenas MAP sem aditivo diferiu do controle, sugerindo que a rápida liberação do MAP, sem modulação, favorece o acúmulo temporário de P na biomassa microbiana (Audette *et al.*, 2020; He *et al.*, 2023; Spohn; Kuzyakov, 2013).

Aos 180 DAI, os teores de Po-MLábil permaneceram muito baixos em todos os tratamentos, sem efeito de fertilizantes, aditivos ou de interação, além de apresentar redução em relação ao controle (Tabela 3; Figura 5J). Esse resultado reforça o caráter transitório dessa fração em solos arenosos de baixo poder tampão.

Aos 180 DAI, o Po-NLábil apresentou interação significativa entre fertilizantes e aditivos, além de diferir do controle (Tabela 3). Houve também expressivo aumento em relação às coletas anteriores, confirmando a progressiva estabilização em formas recalitrantes ao longo do tempo. No MAP, o aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup> promoveu maior acúmulo dessa fração, enquanto no ST não houve diferenças entre as aplicações com ou sem aditivos (Figura 5K). Destaca-se que MAP com KimcoatBioHP<sup>®</sup> e ST sem aditivo foram os únicos tratamentos superiores ao controle, além de superarem, respectivamente, ST com KimcoatBioHP<sup>®</sup> e MAP sem aditivo (Figura 5K). Esses resultados indicam que a formação de Po-NLábil depende fortemente da interação entre fonte e aditivo, reforçando seu papel como compartimento de imobilização a médio prazo (Conte; Anghinoni; Rheinheimer, 2002; He *et al.*, 2023; Novais; Smyth; Nunes, 2007).

As correlações aos 180 DAI (Tabela 4) indicam que o Pi-Fe+Al atuou como fração transitória e integradora, conectando formas lábeis e não lábeis, enquanto o Pi-NLábil refletiu tanto precipitação quanto processos microbianos. Já o Pi-Ca mostrou acúmulo pontual em microambientes ricos em Ca<sup>2+</sup>. Esses padrões evidenciam a redistribuição do P para compartimentos menos disponíveis, com predomínio da precipitação em Fe/Al e da estabilização orgânica, e menor relevância da oclusão. Em relação as frações orgânicas, é possível notar a tendência de conversão para formas menos disponíveis (Tabela 4). O Po-Lábil correlacionou negativamente com Po-MLábil, sugerindo transformação progressiva entre essas frações, enquanto o Po-MLábil também correlacionou negativamente com Po-NLábil, indicando continuidade do processo de estabilização. A correlação positiva entre Po-Lábil e Pi-Lábil aponta para a mineralização microbiana como elo entre formas orgânicas e inorgânicas mais acessíveis (Novais & Smyth, 1999; Bai *et al.*, 2020). O Po-mic apresentou correlações positivas com Pi-NLábil e Pi-Ca, sugerindo participação ativa da biomassa na estabilização indireta do P, seja por mineralização parcial, seja por liberação de metabólitos que favoreçam a precipitação com Ca (Santos *et al.*, 2018; Spohn; Kuzyakov, 2013). Em síntese, aos 180 DAI, a dinâmica do P orgânico no RQo evidenciou transição de formas lábeis e microbianas para compartimentos não lábeis, refletindo processos de mineralização, complexação e precipitação mediados pela interação entre fonte, aditivos e propriedades do solo.

Aos 270 DAI, a fração de Pi-solução foi influenciada apenas pelos aditivos, sem efeito das fontes ou da interação, mas diferindo do controle (Tabela 3). O IFCoat e a ausência de aditivos apresentaram maiores valores que o KimcoatBioHP<sup>®</sup>, embora todos os tratamentos superassem o controle (Figura 3J). Esse comportamento está associado às

características do RQo, que favorecem a mobilidade do P e a redistribuição para compartimentos menos disponíveis (Alleoni *et al.*, 2016; Novais; Smyth, 1999).

A fração de Pi-Lábil foi influenciada por fertilizantes e pela interação com aditivos, além de diferir do controle (Tabela 3). No MAP, os aditivos reduziram o acúmulo em relação ao fertilizante sem revestimento, enquanto no ST o KimcoatBioHP® promoveu maiores valores que IFCoat e a ausência de aditivos (Figura 3K). Todos os tratamentos superaram o controle, indicando persistência do P em formas prontamente disponíveis aos 270 DAI. As oscilações observadas entre coletas sugerem que a eficácia dos aditivos varia no tempo, em função da degradação e interação com a matriz do solo (Chagas *et al.*, 2015; Guelfi *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022).

O Pi-NLábil foi influenciado por fertilizantes, aditivos e pela interação entre ambos, com diferença entre tratamento fatorial e controle (Tabela 3). No MAP, os valores foram baixos, não diferindo entre as aplicações ou não dos aditivos e do controle, enquanto no ST a adição de IFCoat e KimcoatBioHP® resultou em acúmulo expressivo, superando ST sem aditivo, MAP com aditivos e o controle (Figura 3L). Esse comportamento sugere que a combinação ST com aditivos favoreceu a estabilização do P em formas menos disponíveis (Condrón; Newman, 2011; Gatiboni *et al.*, 2007).

A fração de Pi-ocluso foi influenciada apenas pelos fertilizantes, diferindo do controle (Tabela 3). Assim como aos 30 e 90 DAI, o MAP promoveu maiores valores, refletindo a rápida solubilização e retrogradação para formas irreversíveis (Figura 4I) (Barrow, 2017; Novais; Smyth, 1999). Diferentemente das avaliações anteriores, o ST também apresentou valores superiores ao controle (Figura 4I), ainda que em menor magnitude, indicando que com o tempo até mesmo a fonte menos solúvel contribui para o acúmulo de P ocluído (Gatiboni *et al.*, 2007, 2008).

O Pi-Fe+Al foi influenciado pelos fertilizantes e pela interação com aditivos, além de haver diferença entre tratamento fatorial e tratamento controle (Tabela 3). No MAP, o maior acúmulo ocorreu com KimcoatBioHP®, seguido do tratamento sem aditivo e, por último, IFCoat (Figura 4J). Já no ST, o IFCoat resultou no maior valor, seguido de KimcoatBioHP® e da ausência de aditivo (Figura 4J). Comparando entre fontes, IFCoat favoreceu mais o acúmulo com ST, enquanto o KimcoatBioHP® foi mais eficiente com MAP, porém, quando aplicados sem aditivos, MAP e ST não diferiram (Figura 4J), indicando que o efeito sobre essa fração depende essencialmente do tipo de revestimento. Esse padrão mostra que os efeitos mais expressivos dependem do tipo de revestimento,

em consonância com a elevada afinidade do fosfato por óxidos de Fe e Al no RQo Al (Barrow, 2017; Parfitt, 1978; Pessoa-De-Souza *et al.*, 2015).

O Pi-Ca variou com fertilizantes, aditivos e sua interação, havendo diferença do tratamento controle (Tabela 3), mas manteve valores baixos, semelhantes aos observados nas coletas anteriores, confirmando o papel secundário na dinâmica do P em solos arenosos (Alleoni *et al.*, 2016; Haynes; Mokolobate, 2001; Novais; Smyth, 1999). No MAP, o IFCoat reduziu os teores em relação ao KimcoatBioHP® e à ausência de aditivo, enquanto no ST não houve diferença entre aditivos, embora ST com IFCoat superasse MAP com IFCoat (Figura 4K). Apenas MAP com IFCoat não diferiu do controle, sugerindo que esse revestimento pode ter limitado a formação de precipitados de Ca-P (Pavinato *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2022).

Aos 270 DAI, entre as frações orgânicas, apenas Po-mic e Po-NLábil foram influenciados isoladamente pelos fertilizantes, mas todas responderam significativamente à aplicação de aditivos e à interação com as fontes (Tabela 3). Além disso, todas diferiram do controle (Tabela 3), evidenciando a sensibilidade do P orgânico às práticas de manejo avaliadas.

O Po-Lábil respondeu de forma contrastante às fontes e aditivos, no MAP, o KimcoatBioHP® promoveu os maiores valores, enquanto no ST esse mesmo aditivo resultou em menores concentrações, comparado ao IFCoat e ao tratamento sem aditivo (Figura 5L). Na comparação entre fontes, MAP com KimcoatBioHP® superou ST com KimcoatBioHP®, ao passo que ST com IFCoat ou sem aditivos superaram MAP nas mesmas condições (Figura 3L). Apenas MAP sem aditivo e ST com KimcoatBioHP® não diferiram do controle, enquanto todos os demais tratamentos aumentaram os teores de Po-Lábil em relação ao solo não fertilizado (Figura 5L). Esse comportamento antagônico sugere que a cinética de dissolução dos fertilizantes e a ação dos revestimentos modulam de forma distinta a liberação e estabilização do P orgânico (Bai *et al.*, 2020; Novais; Smyth, 1999; Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000).

O Po-mic no MAP não diferiu entre adições ou não de aditivos, indicando estabilidade da microbiota frente a essa fonte (Figura 5M). Já no ST, o IFCoat suprimiu totalmente essa fração não diferindo do controle, enquanto KimcoatBioHP® e a ausência de aditivos resultaram em maiores valores (Figura 5M). MAP com aditivos apresentou maiores teores que ST com os mesmos aditivos (Figura 5M), reforçando que a solubilidade inicial do MAP favorece a imobilização temporária do P pela biomassa (Audette *et al.*, 2020; Spohn; Kuzyakov, 2013).

A fração de Po-MLábil aumentou substancialmente aos 270 DAI (Tabela 3). No MAP, tanto IFCoat quanto KimcoatBioHP<sup>®</sup> resultaram em maiores valores em comparação ao tratamento sem aditivo, enquanto no ST o maior acúmulo ocorreu sem revestimentos (Figura 5N). Comparando entre fontes, os aditivos favoreceram mais o MAP, enquanto ST sem aditivo superou MAP sem aditivo (Figura 5N). Apenas MAP sem aditivo e ST com KimcoatBioHP<sup>®</sup> não diferiram do controle (Figura 5N), evidenciando que, de modo geral, a maioria dos tratamentos favoreceu o acúmulo de formas orgânicas moderadamente lábeis no RQo. Esse comportamento sugere que o Po-MLábil atua como reservatório intermediário, modulando o equilíbrio entre formas lábeis e recalcitrantes (Bai *et al.*, 2020; Condrón; Newman, 2011).

O Po-NLábil apresentou valores extremamente baixos, aos 270 DAI (Tabela 3; Figura 5O). No MAP, o KimcoatBioHP<sup>®</sup> promoveu o maior acúmulo, seguido do tratamento sem aditivo, enquanto o IFCoat praticamente suprimiu essa fração (Figura 5O). No ST, todas as combinações resultaram em ausência de Po-NLábil (Figura 5O), sugerindo maior mineralização ou menor proteção coloidal. Nenhum tratamento diferiu do controle, confirmando a baixa representatividade dessa fração no RQo (Brookes; Powlson; Jenkinson, 1982; He *et al.*, 2023).

As correlações aos 270 DAI (Tabela 4) reforçam padrões consistentes com os resultados do experimento e com o que já foi discutido na literatura (Bai *et al.*, 2020; Condrón; Newman, 2011; Gatiboni *et al.*, 2007, 2008; Novais; Smyth; Nunes, 2007; Pavinato *et al.*, 2020). O Pi-solução e o Pi-Lábil estiveram associados a frações transitórias (Pi-Fe+Al, Pi-Ca, Po-Lábil e Po-MLábil), confirmando a função como elo entre compartimentos disponíveis e de retenção. O Pi-NLábil correlacionou-se positivamente com Pi-Fe+Al e negativamente com Po-MLábil, indicando que parte do P mineralizado foi estabilizada em formas inorgânicas pouco disponíveis. O Pi-ocluso associou-se ao Pi-Lábil e Po-NLábil, sugerindo incorporação progressiva em formas irreversíveis, enquanto o Pi-Ca correlacionou-se apenas com frações reativas, confirmando a baixa persistência. Entre as frações orgânicas, o Po-Lábil manteve forte vínculo com compartimentos inorgânicos móveis, o Po-mic conectou frações lábeis e não lábeis, e o Po-MLábil atuou como reservatório transitório.

Aos 360 DAI, a fração de Pi-solução foi significativamente influenciada pela interação entre fertilizantes e aditivos, diferindo do tratamento controle (Tabela 3). Para o MAP, não houve diferença entre os tratamentos com ou sem aditivos, comportamento semelhante ao observado aos 180 DAI (Figuras 3G e 3M), sugerindo estabilização do

efeito residual dessa fonte ao longo do tempo. Já para o ST, a aplicação com IFCoat promoveu os maiores valores de Pi-solução, superando significativamente tanto o KimcoatBioHP<sup>®</sup> quanto a ausência de aditivo (Figura 3M). No entanto, todas as interações entre fertilizante e aditivos diferiram do controle (Figura 3M). Esse comportamento evidencia que a resposta dos aditivos é dependente da fonte, refletindo as diferenças de solubilidade entre MAP e ST e o efeito modulador dos revestimentos sobre a liberação e retenção do P em solução (Alleoni *et al.*, 2016; Novais; Smyth, 1999).

A fração de Pi-Lábil também foi alterada pela aplicação de fertilizantes, aditivos e pela interação entre esses fatores, apresentando diferença ao tratamento controle (Tabela 3). O valor médio aos 360 DAI foi de 93,47 mg kg<sup>-1</sup>, superior às coletas anteriores, indicando liberação tardia de P para compartimentos mais disponíveis (Tabela 3). No MAP, o aditivo KimcoatBioHP<sup>®</sup> proporcionou os maiores teores, seguido do tratamento sem aditivos, enquanto o IFCoat resultou nos menores valores (Figura 3N). Para o ST, o IFCoat promoveu maior acúmulo dessa fração, seguido do tratamento sem aditivos, enquanto o KimcoatBioHP<sup>®</sup> apresentou os menores teores (Figura 3N). Esses resultados mostram que o desempenho dos aditivos foi dependente da fonte fosfatada, sugerindo que a interação entre a solubilidade intrínseca do fertilizante e a modulação proporcionada pelos revestimentos determinou a persistência do P em formas lábeis (Chagas *et al.*, 2015; Guelfi *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022). Quase todos os tratamentos diferiram do controle (Figura 3N), exceto MAP com IFCoat, reforçando o efeito residual dos insumos mesmo após 12 meses de incubação.

A fração de Pi-NLábil não foi influenciada significativamente por fertilizantes, aditivos ou pela interação entre esses fatores aos 360 DAI (Tabela 3), havendo apenas diferença entre os tratamentos com fertilizantes e o controle (Figura 3O). Isso indica que, após nove meses de incubação, os mecanismos de imobilização associados a essa fração atingiram novo equilíbrio, tornando-se pouco responsivos à adição de fontes externas. Esse comportamento é típico de solos arenosos e de baixa CTC, como o RQo, nos quais a estabilização em formas menos lábeis tende a ocorrer rapidamente em condições sem cultivo, pela ausência de raízes e exsudatos que poderiam mobilizar o P retido (Alleoni *et al.*, 2016; Pessoa-De-Souza *et al.*, 2015).

A fração de Pi-ocluso apresentou acúmulo expressivo aos 360 DAI (612,74 mg kg<sup>-1</sup>), sendo influenciada por fertilizantes e aditivos, mas sem interação entre fatores (Tabela 3). O ST promoveu maiores valores em comparação ao MAP, enquanto o IFCoat reduziu a formação de P ocluído em relação ao KimcoatBioHP<sup>®</sup>, à ausência de aditivo e

ao controle (Figura 4L). Esse comportamento sugere que a oclusão final do P residual no sistema foi modulada tanto pela fonte fosfatada quanto pelos aditivos, mas com efeito mais evidente para ST. A tendência de acúmulo tardio confirma que o Pi-ocluso atua como fração de estabilização final, incorporando o P em complexos de esfera interna com óxidos de Fe e Al cristalinos (Havlin, 2017; Parfitt, 1978; Souza Júnior *et al.*, 2012). Esse padrão é consistente com o observado anteriormente, em que a fração apresenta acúmulo precoce (30 DAI) ou tardio (360 DAI), mas pouca dinâmica nos períodos intermediários (Cross; Schlesinger, 1995; Syers; Johnston; Curtin, 2008).

Aos 360 DAI, a fração de Pi-Fe+Al deixou de responder à aplicação de aditivos ou à interação com fertilizantes, havendo apenas diferença entre os tratamentos com fertilizantes e o controle (Tabela 3). A aplicação de fontes fosfatadas resultou em maior precipitação de P associado a óxidos de Fe e Al (Figura 4M), refletindo a saturação progressiva dos sítios de adsorção ao longo do tempo (Barrow, 2017; Havlin, 2017; Pessoa-De-Souza *et al.*, 2015). Esse resultado indica que, em sistemas sem plantas, o efeito residual dos fertilizantes tende a estabilizar-se nesse compartimento, limitando a eficiência agrônômica do fósforo disponível.

A fração de Pi-Ca apresentou diferença apenas entre os tratamentos fatoriais e o controle (Tabela 3; Figura 4N), sem efeito isolado de fertilizantes, aditivos ou de suas interações. Esse comportamento indica o esgotamento dos efeitos moduladores da aplicação de fontes fosfatadas e aditivos sobre a precipitação de P com cálcio, mantendo valores baixos e pouco expressivos no RQo, coerente com as características de solos arenosos e de baixa CTC (Novais; Smyth, 1999; Pavinato *et al.*, 2020).

Para Po-Lábil, aos 360 DAI, não houve efeito significativo de fertilizantes, aditivos ou da interação, observou-se apenas diferença entre o fatorial e o controle (Tabela 3). O controle apresentou o maior teor de Po-Lábil (Figura 5P). Esse acúmulo em ausência de P mineral é compatível com sistemas sem cultivo, nos quais menor mineralização e menor consumo microbiano podem manter P orgânico em formas mais reativas (Bai *et al.*, 2020; Novais; Smyth, 1999; Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000).

Na fração Po-mic, apesar de haver efeito estatístico de fertilizantes, aditivos e interação (Tabela 3), os valores caíram acentuadamente (Tabela 3), retornando ao patamar inicial. Além disso, houve diferença entre tratamento fatorial e controle (Tabela 3). No MAP, apenas IFCoat e KimcoatBioHP® elevaram Po-mic em relação ao controle, no entanto, MAP sem aditivo levou a valores indetectáveis dessa fração (Figura 5Q). Sendo que na aplicação do ST, todas as combinações, com ou sem aditivos, também

resultaram em valores nulos ou muito baixos e sem diferenças entre si (Figura 5Q). O resultado reforça o caráter transitório do P microbiano e a sensibilidade à oferta imediata de P e ao ambiente edáfico em sistema sem plantas (Audette *et al.*, 2020; Bai *et al.*, 2020; Moreira; Siqueira, 2006; Spohn; Kuzyakov, 2013).

Aos 360 DAI, para o Po-MLábil, não houve efeito de fertilizantes, aditivos ou interação (Tabela 3). Sendo que essa fração sofreu redução drástica ( $0,37 \text{ mg kg}^{-1}$ ), com o controle exibindo valor superior ao fatorial (Tabela 3; Figura 5R). Isso indica forte transformação dessa reserva intermediária por mineralização ou estabilização em formas menos disponíveis ao longo do tempo (Condrón; Newman, 2011; Costa *et al.*, 2024; Novais; Smyth; Nunes, 2007).

Para a fração Po-NLábil, foram observados efeitos de fertilizantes, aditivos e da interação, além de diferença em relação ao controle (Tabela 3). No MAP, as aplicações com e sem aditivo não diferiram entre si (Figura 5S). O ST com KimcoatBioHP<sup>®</sup> gerou valores superiores ao ST sem aditivo e com IFCoat, além de superar o MAP com o mesmo aditivo (Figura 5S). Ainda assim, quase todos os tratamentos ficaram abaixo do controle, exceto MAP com IFCoat e ST com KimcoatBioHP<sup>®</sup>, que não diferiram, refletindo a baixa representatividade dessa fração no RQo ao final da incubação e possível conversão prévia, entre os 180 aos 270 DAI (Figuras 5K e 5O) para formas inorgânicas estáveis (He *et al.*, 2023; Novais; Smyth; Nunes, 2007; Rheinheimer; Anghinoni; Conte, 2000).

As correlações aos 360 DAI reforçam a transição do P para formas menos disponíveis ao final do experimento. O Pi-solução e o Pi-Lábil estiveram positivamente associados a Pi-NLábil e Pi-Fe+Al, confirmando a conversão progressiva do P solúvel em frações retidas por adsorção ou precipitação (Bai *et al.*, 2020; Novais; Smyth, 1999). Em contrapartida, ambos apresentaram correlações negativas com as frações orgânicas (Po-Lábil, Po-MLábil e Po-NLábil), sugerindo mineralização ou competição por sítios de retenção entre compartimentos orgânicos e inorgânicos. O Pi-ocluso mostrou independência estatística, reforçando seu papel como compartimento de acúmulo refratário (Parfitt, 1978; Souza Júnior *et al.*, 2012). Entre as frações orgânicas, o Po-Lábil manteve associação quase exclusiva com Po-MLábil, enquanto o Po-mic e o Po-NLábil deixaram de relacionar-se com outras frações, evidenciando esgotamento da microbiota e estabilização final do P no sistema (He *et al.*, 2023; Spohn; Kuzyakov, 2013).

#### 5.4 Conclusão

No Neossolo Quartzarênico órtico, solo arenoso e de baixa capacidade tampão, a dinâmica do fósforo foi marcada pela rápida conversão das formas lábeis em compartimentos menos disponíveis. A baixa CTC e a mineralogia dominada por caulinita e hematita favoreceram a precipitação e a imobilização do P em formas de difícil reversão, restringindo a eficiência dos fertilizantes ao longo do tempo.

Nas fases iniciais, o MAP associado aos aditivos KimcoatBioHP<sup>®</sup> e IFCoat elevou o Pi-solução, demonstrando liberação rápida e eficiente. Contudo, essa disponibilidade mostrou-se transitória, pois o P liberado migrou rapidamente para Pi-Fe+Al, Pi-NLábil e Pi-ocluso, evidenciando a baixa resiliência do sistema em manter o P em formas lábeis. A partir de 90 dias, o ST sem aditivo passou a manter níveis mais estáveis de Pi-solução e Pi-lábil, ainda que parte desse P tenha sido redistribuída para Pi-Fe+Al. Nesse mesmo período, o MAP com aditivos também promoveu aumento do Pi-Fe+Al, refletindo a forte reatividade do solo mesmo diante de tecnologias de liberação controlada.

O período intermediário revelou um pico de Po-mic, indicando intensa imobilização microbiana e atuação da biomassa como um tampão transitório de P. A correlação entre Po-mic e Pi-solução mostrou que, com a redução da atividade microbiana após 180 dias, o P antes imobilizado retorna à solução, mas é rapidamente precipitado em Pi-Fe+Al e Pi-ocluso, processo que reforça a baixa reversibilidade da fixação no RQo.

Ao final do experimento, o leve aumento em Pi-lábil sugeriu liberação tardia do P orgânico previamente imobilizado. Entretanto, o acúmulo expressivo de Pi-ocluso confirmou a tendência dominante de estabilização do nutriente em formas mineralmente fixadas.

Assim, em solos arenosos e de baixa proteção coloidal como o RQo, o manejo mais inteligente deve priorizar a sincronização da aplicação de fertilizantes com o período de maior demanda das culturas, utilizando fontes parcialmente solúveis ou aditivadas que favoreçam a liberação inicial, mas evitem perdas rápidas. Estratégias como o parcelamento da adubação e o uso de aditivos que prolonguem a permanência do P em solução são fundamentais para ampliar a eficiência agrônômica e reduzir a retrogradação em ambientes de alta vulnerabilidade química.

## REFERÊNCIAS

- ACHARY, V. Mohan M. *et al.* Phosphite: a novel P fertilizer for weed management and pathogen control. **Plant Biotechnology Journal**, v. 15, n. 12, p. 1493–1508, 2017.
- ALCARDE, José Carlos. Fertilizantes. *In*: NOVAIS, Roberto Ferreira *et al.* (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa-MG: SBCS, 2007. p. 737–768.
- ALI, N. S.; AL-JUTHERY, H. W. A. The application of nanotechnology for micronutrient in agricultural production (review article). **Iraqi Journal of Agricultural Sciences**, v. 48, n. 4, 13 ago. 2017.
- ALLEONI, Luis Reynaldo Ferracciú *et al.* Química dos solos altamente intemperizados. **Química e mineralogia do solo. v. 2: aplicações**, p. 685 il, 2016.
- ALVAREZ V., V. H. NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E. OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, 2000, 25:27-33. (Boletim Informativo).
- ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. *In*: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Orgs.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba/SP: POTAFOS, 2004. p. 537–562.
- ARAÚJO, Brilhar *et al.* **Solubilização de fosfatos e potássio por bactérias rizosféricas uma revisão. EBSCOhost.** Disponível em: <<https://openurl.ebsco.com/contentitem/doi:10.31413%2Fnat.v12i4.17576?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:doi:10.31413%2Fnat.v12i4.17576>>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- ARENBERG, Mary R.; LIANG, Xinqiang; ARAI, Yuji. Immobilization of agricultural phosphorus in temperate floodplain soils of Illinois, USA. **Biogeochemistry**, v. 150, n. 3, p. 257–278, 2020.
- ASHRAF, M. N. *et al.* Evaluating Organic Materials Coating on Urea as Potential Nitrification Inhibitors for Enhanced Nitrogen Recovery and Growth of Maize (*Zea mays*). **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 22, n. 5, p. 1102–1108, 2019.
- AUDETTE, Yuki *et al.* Phosphorus binding to soil organic matter via ternary complexes with calcium. **Chemosphere**, v. 260, p. 127624, 1 dez. 2020.
- AZIZ, Tariq *et al.* Phosphorus deficiency in plants: Responses, adaptive mechanisms, and signaling. **Plant Signaling: Understanding the Molecular Crosstalk**, v. 9788132215424, p. 133–148, 1 out. 2014.
- BAI, Yong-Chao *et al.* Soil Chemical and Microbiological Properties Are Changed by Long-Term Chemical Fertilizers That Limit Ecosystem Functioning. **Microorganisms**, v. 8, n. 5, p. 694, 8 maio 2020.
- BALDOTTO, Maribus Altoé; VELLOSO, Ary Carlos Xavier. Eletroquímica de solos modais e de sua matéria orgânica em ambientes tropicais. **Revista Ceres**, v. 61, n. 6, p. 1012–1021, 2014.

BARBOSA, Kássia de Paula. Fontes e formas de aplicação de fertilizantes fosfatados em cultivos consecutivos de soja em Latossolo de alta fertilidade. nov. 2020.

BARROW, N. J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. **Journal of Soil Science**, v. 34, n. 4, p. 733–750, 1983.

BARROW, N. J. Reaction of Anions and Cations with Variable-Charge Soils. *In: Advances in Agronomy*. [S.l.]: Elsevier, 1986. v. 38 p. 183–230.

BARROW, N. J. Soil phosphate chemistry and the P-sparing effect of previous phosphate applications. **Plant and Soil**, v. 397, n. 1–2, p. 401–409, 2015.

BARROW, N. J. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. **Plant and Soil**, v. 410, n. 1–2, p. 401–410, 2017.

BARROW, N. J. *et al.* The soil phosphate fractionation fallacy. **Plant and Soil**, v. 459, n. 1–2, p. 1–11, 1 fev. 2021.

BASINSKI, Jade J. *et al.* Unraveling iron oxides as abiotic catalysts of organic phosphorus recycling in soil and sediment matrices. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 5930, 18 jul. 2024.

BAZANI, José Henrique. **Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto**. Mestrado em Recursos Florestais—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.

BENNETT, Elena M.; SCHIPANSKI, Meagan E. Chapter 8 - The Phosphorus Cycle. *In: WEATHERS, Kathleen C.; STRAYER, David L.; LIKENS, Gene E. (Orgs.). Fundamentals of Ecosystem Science*. [S.l.]: Academic Press, 2013. p. 159–178.

BOLAN, N. S.; WHITE, R. E.; HEDLEY, M. J. A Review of The Use of Phosphate Rocks As Fertilisers For Direct Application in Australia and New Zealand. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 30, n. 2, p. 297–313, 1990.

BOOMSMA, Anne. Structural Equation Modeling: Foundations and Extensions (Advanced Quantitative Techniques in the Social Sciences Series, Vol. 10.) by David Kaplan. **Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal**, v. 10, n. 2, p. 323–331, abr. 2003.

BORGES, W. L. *et al.* Agronomic efficiency of fertilizers with aggregate technology in the Brazilian Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 18, n. 4, p. 1–7, 31 dez. 2023.

BOWMAN, R. A.; VIGIL, M. F. Soil testing for different phosphorus pools in cropland soils of the Great Plains. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 57, n. 6, p. 479–485, nov. 2002.

BRADY, Nyle C.; WEIL, Ray R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. [S.l.]: Bookman, 2013.

BRAOS, L. B. *et al.* Dynamics of phosphorus fractions in soils treated with dairy manure. **Soil Research**, v. 58, n. 3, p. 289–298, 20 jan. 2020.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 14, n. 4, p. 319–329, 1 jan. 1982.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Phosphorus in the soil microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 16, n. 2, p. 169–175, jan. 1984.

BÜNEMANN, E. K. *et al.* Rapid microbial phosphorus immobilization dominates gross phosphorus fluxes in a grassland soil with low inorganic phosphorus availability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 51, p. 84–95, ago. 2012.

BYRNE, Barbara M. **Structural equation modeling with AMOS: basic concepts, applications, and programming**. Second edition (Online-Ausg.) ed. New York: Routledge, 2010.

CAIONE, Gustavo; PRADO, Renato de Mello. **Nutrição e adubação de pastagens**. [S.l.]: Fcav, 2021.

CALHEIROS, A. S. *et al.* Nível crítico de fósforo por diferentes extratores químicos em Neossolo Flúvico alcalino cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 7, n. 4, p. 590–596, 5 dez. 2012.

CARMO, Thiago Rezende Lima Do; CABALLERO, Segundo Sacramento Urquiaga; ALVES, Bruno José Rodrigues. Balanço geral de nitrogênio e fósforo na agropecuária brasileira no período de 1990 a 2020. *In*: ZONTA, Everaldo; PEREIRA, Marcos Gervasio (Eds.). **Agricultura, Mudanças Climáticas e Segurança Alimentar - Anais do VI Simpósio ABC (Argentina-Brasil-Cuba)**. 1. ed. [S.l.]: Atena Editora, 2023. p. 356–361.

CARNEIRO, Leandro Flávio *et al.* Frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um Latossolo com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 483–491, abr. 2011.

CARRINGTON, Damian. Phosphate fertiliser “crisis” threatens world food supply. **The Guardian**, 2019.

CARVALHO, Rui *et al.* Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 3, p. 557–565, 2001.

CEKINSKI, E. Fertilizantes Fosfatados. *In*: CEKINSKI, E. *et al.* (Eds.). **Tecnologia de Produção de Fertilizantes**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990. p. 95–129.

CHAGAS, Wantuir Filipe Teixeira *et al.* Productive characteristics, nutrition and agronomic efficiency of polymer-coated MAP in lettuce crops. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 2, 2015.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science, Baltimore**. v. 84, p. 133–144, 1957.

CHEN, C. R. *et al.* Effects of afforestation on phosphorus dynamics and biological properties in a New Zealand grassland soil. **Plant and Soil**, v. 220, n. 1–2, p. 151–163, 2000.

CHIEN, S. H. *et al.* Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 89, n. 2, p. 229–255, 2011.

CHOWDHURY, Rubel Biswas *et al.* Key sustainability challenges for the global phosphorus resource, their implications for global food security, and options for mitigation. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 945–963, jan. 2017.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M. Effects of long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zealand. **Journal of Soil Science**, v. 40, n. 2, p. 383–395, 1989.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by  $^{31}\text{P}$  nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, v. 36, n. 2, p. 199–207, 1985.

CONDRON, L. M.; TIESSEN, H. Interactions of organic phosphorus in terrestrial ecosystems. *In*: TURNER, B. L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. S. (Orgs.). **Organic phosphorus in the environment**. 1. ed. UK: CABI Publishing, 2005. p. 295–307.

CONDRON, Leo M.; NEWMAN, Susan. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, n. 5, p. 830–840, 2011.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 925–930, dez. 2002.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 893–900, out. 2003.

CORRÊA, Rossini Mattos; NASCIMENTO, Clístenes Williams Araújo Do; ROCHA, Alexandre Tavares Da. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 153–159, 2 mar. 2011.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M. Óxidos de ferro. *In*: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e mineralogia do solo**. 1. ed. Viçosa: SBCS, 2009. v. 1 p. 505–572.

COSTA, Karla Samylle De Queiroz *et al.* Fósforo no sistema solo-planta: uma revisão. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 6, p. e5361, 20 jun. 2024.

COSTA, Marlon *et al.* Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus Plantations, Brazil. **Forests**, v. 7, n. 1, p. 15, 2016.

CROSS, Anne Fernald; SCHLESINGER, William H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, v. 64, n. 3–4, p. 197–214, 1995.

DA CRUZ, Diego Fernandes *et al.* Role of Polymeric Coating on the Phosphate Availability as a Fertilizer: Insight from Phosphate Release by Castor Polyurethane Coatings. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 29, p. 5890–5895, 26 jul. 2017.

DA SILVA, Erika Caitano *et al.* Does Structural Equation Modeling Provide a Holistic View of Phosphorus Acquisition Strategies in Soils of Amazon Forest? **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 3, p. 3334–3347, set. 2022.

DE FIGUEIREDO, Cícero Célio *et al.* Polymer-coated phosphate fertilizer and liming on the production and morphological parameters of corn. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 43, n. 3, p. 446–452, 2012.

DO NASCIMENTO, Carlos A. C. *et al.* Phosphorus Mobility and Behavior in Soils Treated with Calcium, Ammonium, and Magnesium Phosphates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, n. 3, p. 622–631, 2018.

DONAGEMMA, Guilherme Kangussu *et al.* Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003–1020, 2016.

DUDA, Gustavo Pereira *et al.* Avaliação da biodisponibilidade de fósforo em diferentes classes de solos do Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 4, p. 1563–1576, 30 ago. 2013.

EISENHAEUER, Nico *et al.* From patterns to causal understanding: Structural equation modeling (SEM) in soil ecology. **Pedobiologia**, v. 58, n. 2–3, p. 65–72, mar. 2015.

ELSER, James; BENNETT, Elena. A broken biogeochemical cycle. **Nature**, v. 478, n. 7367, p. 29–31, 2011.

EVERAERT, Maarten *et al.* Agronomic Effectiveness of Granulated and Powdered P-Exchanged Mg-Al LDH Relative to Struvite and MAP. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 32, p. 6736–6744, 16 ago. 2017.

FAGERIA, Nand Kumar. **The Use of Nutrients in Crop Plants**. 0. ed. [S.l.]: CRC Press, 2009.

FALCÃO, Newton Paulo De Souza; SILVA, José Risonei Assis Da. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 3, p. 337–342, 2004.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt: Pacote experimental designs.**, 2021.

FIXEN, P. E.; GROVE, J. H. Testing Soils for Phosphorus. *In*: WESTERMAN, R. I. (Ed.). **Soil Testing and Plant Analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 1990. v. 3 p. 141–180.

FONSECA, D. M., ALVAREZ V., V. H., NEVES, J. C. L., GOMIDE, J. A., NOVAIS, R. F. & BARROS, N. F. Níveis críticos de fósforo em amostras de solos para estabelecimento de *Andropogon gayanus*, *Brachiaria decumbens*, *Hyparrhenia rufa*. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Campinas v.12, n. 4, p. 49-58, 1988.

FOX, John; NIE, Zhenghua; BYRNES, Jarrett. **Sem: Structural equation models.** , 2024. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=sem>>

FOX, Thomas R. *et al.* Phosphorus Nutrition of Forest Plantations: The Role of Inorganic and Organic Phosphorus. *In*: BÜNEMANN, Else; OBERSON, Astrid; FROSSARD, Emmanuel (Orgs.). **Phosphorus in Action**. Soil Biology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. v. 26 p. 317–338.

FREITAS, Idelfonso Colares De. **Atributos de um Neossolo Quartzarênico da pré-Amazônia sob agroecossistemas de produção familiar**. Goiânia-GO: UFG, 2013.

GAMA-RODRIGUES, A. C. *et al.* An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. **Biogeochemistry**, v. 118, n. 1–3, p. 453–469, 17 abr. 2014.

GAO, Shengchao *et al.* Effects of humic acid-enhanced phosphate fertilizer on wheat yield, phosphorus uptake, and soil available phosphorus content. **Crop Science**, v. 63, n. 2, p. 956–966, 1 mar. 2023.

GATIBONI, Luciano Colpo *et al.* Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 691–699, ago. 2007.

GATIBONI, Luciano Colpo *et al.* Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos líquidos de suínos em pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1753–1761, 2008.

GATIBONI, Luciano Colpo; BRUNETTO, Gustavo; KAMINSKI, João. **Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações**. 2013.

GATIBONI, Luciano Colpo; KAMINSKI, João; SANTOS, Danilo Rheinheimer dos. Modificações nas formas de fósforo do solo após extrações sucessivas com Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 363–371, 2005.

GRACE, James B. **Structural Equation Modeling and Natural Systems**. 1. ed. Cambridge: University Press, 2006.

GRACE, James B.; BOLLEN, Kenneth A. Representing general theoretical concepts in structural equation models: the role of composite variables. **Environmental and Ecological Statistics**, v. 15, n. 2, p. 191–213, jun. 2008.

GUEDES, Rafael Silva *et al.* Adsorption and desorption kinetics and phosphorus hysteresis in highly weathered soil by stirred flow chamber experiments. **Soil and Tillage Research**, v. 162, p. 46–54, set. 2016.

GUELF, Douglas *et al.* Innovative Phosphate Fertilizer Technologies to Improve Phosphorus Use Efficiency in Agriculture. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 21, 1 nov. 2022.

GUELF, Douglas Ramos *et al.* Monoammonium phosphate coated with polymers and magnesium for coffee plants. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 3, p. 261–270, 1 maio 2018.

GUO, Fengmao; YOST, Russell S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Science**, v. 163, n. 10, p. 822–833, 1998.

HAIR, Joseph F. *et al.* Multivariate data analysis (8. Baskı). **Eight Edition, Cengage: Learning EMEA**, 2019.

HAIR JR., Joseph F. *et al.* **Análise Multivariada De Dados**. 6. ed. [S.l.]: Bookman, 2009.

HANSEL, Fernando Dubou. **Fertilizantes fosfatados aplicados a lanço e em linha na cultura da soja sob semeadura direta**. Unpublished, , 2013. Disponível em: <<http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.3641.7529>>. Acesso em: 12 ago. 2025

HANYABUI, Emmanuel *et al.* Phosphorus sorption in tropical soils. **AIMS Agriculture and Food**, v. 5, n. 4, p. 599–616, 2020.

HAVLIN, John L. **Soil Fertility and Fertilizers**. 8. ed. [S.l.]: Pearson India, 2017.

HAWKINS, J. M. B. *et al.* The effect of soil organic matter on long-term availability of phosphorus in soil: Evaluation in a biological P mining experiment. **Geoderma**, v. 423, p. 115965, 1 out. 2022.

HAYNES, R. J.; MOKOLOBATE, M. S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 59, n. 1, p. 47–63, jan. 2001.

HE, Xianjin *et al.* Global patterns and drivers of phosphorus fractions in natural soils. **Biogeosciences**, v. 20, p. 4147–4163, 2023.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in Inorganic and Organic Soil Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 5, p. 970–976, set. 1982.

HELFENSTEIN, Julian *et al.* Soil solution phosphorus turnover: derivation, interpretation, and insights from a global compilation of isotope exchange kinetic studies. **Biogeosciences**, v. 15, n. 1, p. 105–114, 8 jan. 2018.

HINGSTON, F. J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite - I: the role of the proton in determining adsorption envelopes. **Journal of Soil Science**, v. 23, p. 177–191, 1972.

HOU, Enqing *et al.* A structural equation model analysis of phosphorus transformations in global unfertilized and uncultivated soils. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 30, n. 9, p. 1300–1309, set. 2016.

HOU, Enqing *et al.* Solubility of phosphorus in subtropical forest soils as influenced by low-molecular organic acids and key soil properties. **Geoderma**, v. 313, p. 172–180, 1 mar. 2018.

HOYLE, Rick H.; SMITH, Gregory T. Formulating clinical research hypotheses as structural equation models: A conceptual overview. **Journal of Consulting and Clinical Psychology**, v. 62, n. 3, p. 429–440, 1994.

HU, Li-tze; BENTLER, Peter M. Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. **Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal**, v. 6, n. 1, p. 1–55, 1999.

ICHINOSE, Yuri *et al.* How do reactive aluminum and iron phases control soil organic carbon and phosphate adsorption capacity in agricultural topsoils across Japan? **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 71, n. 1, p. 38–52, 2 jan. 2025.

IKHAJIAGBE, Beckley *et al.* RETRACTED: Major phosphorus in soils is unavailable, yet critical for plant development. **Notulae Scientia Biologicae**, v. 12, n. 3, p. 500–535, 29 set. 2020.

IRIONDO, José M.; ALBERT, María J.; ESCUDERO, Adrián. Structural equation modelling: an alternative for assessing causal relationships in threatened plant populations. **Biological Conservation**, v. 113, n. 3, p. 367–377, out. 2003.

JASINSKI, Stephen. **Phosphate Rock, Mineral Commodity Summaries 2025.** , 2025.

JASINSKI, Stephen M. **Phosphate Rock, Mineral Commodity Summaries 2021.** , 2021.

JOLLIFFE, I. T. **Principal Component Analysis.** New York: Springer-Verlag, 2002.

JÖRESKOG, Karl G.; SÖRBOM, Dag. Recent Developments in Structural Equation Modeling. **Journal of Marketing Research**, v. 19, n. 4, p. 404–416, nov. 1982.

KAFLE, Arjun *et al.* Harnessing Soil Microbes to Improve Plant Phosphate Efficiency in Cropping Systems. **Agronomy**, v. 9, n. 3, p. 127, 8 mar. 2019.

KAISER, Henry F. The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 141–151, abr. 1960.

KAPLAN, D. **Structural equation modeling: foundations and extensions.** Thousand Oaks, California: Sage Publications, 2000. v. 10

KASSEM, Ihsane *et al.* Biodegradable all-cellulose composite hydrogel as eco-friendly and efficient coating material for slow-release MAP fertilizer. **Progress in Organic Coatings**, v. 162, p. 106575, 1 jan. 2022.

KLIN, Rex B. **Principles and practice of structural equation modeling, 4th ed.** New York, NY, US: The Guilford Press, 2016. p. xvii, 534

KLOTZBÜCHER, Anika *et al.* Testing mechanisms underlying the Hedley sequential phosphorus extraction of soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 182, n. 4, p. 570–577, ago. 2019.

KORKMAZ, Selcuk; GOKSULUK, Dincer; ZARARSIZ, Gokmen. MVN: An R Package for Assessing Multivariate Normality. **The R Journal**, v. 6, n. 2, p. 151, 2014.

KOUR, Divjot *et al.* Biodiversity, current developments and potential biotechnological applications of phosphorus-solubilizing and -mobilizing microbes: A review. **Pedosphere**, v. 31, n. 1, p. 43–75, fev. 2021.

LÊ, Sébastien; JOSSE, Julie; HUSSON, François. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, p. 1–18, 2008.

LEHNINGER, Albert L. **Short course in biochemistry**. New York: Worth Publishers, 1973.

LEITE, Jacqueline Nayara Ferraça *et al.* Frações orgânicas e inorgânicas do fósforo no solo influenciadas por plantas de cobertura e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 11, p. 1880–1889, nov. 2016.

LIMA, Regina Lúcia Félix De Aguiar. Micorrizas arbusculares e absorção de fósforo em função da capacidade de fixação de fósforo do solo e da competição com a microbiota. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1062–1079, 1 jun. 2020.

LINDSAY, W. L.; LEHR, J. R.; STEPHENSON, H. F. Nature of the Reactions of Monocalcium Phosphate Monohydrate in Soils: III. Studies with Metastable Triple-Point Solution. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 5, p. 342–345, 1959.

LINDSAY, W. L.; STEPHENSON, H. F. Nature of the Reactions of Monocalcium Phosphate Monohydrate in Soils: II. Dissolution and Precipitation Reactions Involving Iron, Aluminum, Manganese, and Calcium. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 1, p. 18–22, 1959.

LINDSAY, Willard L. **Chemical Equilibria in Soils**. New York: John Wiley & Sons, 1979.

LISHINSKI, Alex. lavaanPlot: Path diagrams for Lavaan models via DiagrammeR. **R package version 0.6**, v. 2, p. 2021, 2021.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; CUNHA, J. F. da. **Superfosfato Simples**. São Paulo: Gráfica Nagy, 2010.

LU, Chun *et al.* Phosphorus Dynamics in Managed and Natural Soils: SEM-PLS Analysis of Vaccinium, Forest, and Grassland Ecosystems. **Plants**, v. 14, n. 2, p. 189, jan. 2025.

LUO, Yuan-Jun; YUAN, Da-Gang; HUANG, Lai-Ming. Soil phosphorus fraction and availability dynamics along a 2-million-year soil chronosequence in northern Hainan Island, China. **Geoderma**, v. 448, p. 116957, ago. 2024.

MACDONALD, Graham K. *et al.* Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 7, p. 3086–3091, 2011.

MALAVOLTA, E. *et al.* Estudos sobre a nutrição mineral do arroz: XV. absorção radicular e foliar do radiofosforo pelas variedades IAC-47 e IAC-435. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 38, n. 2, p. 695–721, 1981.

MARSCHNER, Horst. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed ed. London Waltham, MA: Academic Press, 2012.

MARTINAZZO, Rosane *et al.* Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 563–570, jun. 2007.

MCLAREN, Timothy I. *et al.* The chemical nature of organic phosphorus that accumulates in fertilized soils of a temperate pasture as determined by solution<sup>31</sup>P NMR spectroscopy. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 180, n. 1, p. 27–38, fev. 2017.

MIGNACCA, Flávia Alessandra. **Fracionamento de fósforo de um Argissolo Vermelho distroférico submetido a manejos de correção e adubação em sistema de integração lavoura-pecuária. 2016**. Universidade do Oeste Paulista, UNOESTE, Brasil, 2016. Disponível em: <<http://bdt.d.unoeste.br:8080/jspui/handle/jspui/1046>>

MIHAILESCU, E. *et al.* Phosphorus balance and use efficiency on 21 intensive grass-based dairy farms in the South of Ireland. **The Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 3, p. 520–537, 2015.

MIRABELLO, M. J. *et al.* Soil phosphorus responses to chronic nutrient fertilisation and seasonal drought in a humid lowland forest, Panama. **Soil Research**, v. 51, n. 3, p. 215, 2013.

MIRANDA, Li Chaves. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados de diferentes tempos de liberação aplicados em solos de textura contrastante**. Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal—[S.l.]: UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI, 2023.

MITCHELL, R. J. Testing Evolutionary and Ecological Hypotheses Using Path Analysis and Structural Equation Modelling. **Functional Ecology**, v. 6, n. 2, p. 123, 1992.

MME. **Relatório Técnico 54 - Perfil do Enxofre**. Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2009.

MOREIRA, A. *et al.* Avaliação da disponibilidade do fósforo no solo por métodos isotópico, químicos e biológico. **Scientia Agricola**, v. 54, p. 1–2, 1997.

MOREIRA, Fatima Maria De Souza; SIQUEIRA, Jose Oswaldo. **Microbiologia E Bioquímica Do Solo**. 2. ed. [S.l.]: Editora da UFLA, 2006.

- MOUSAVI, Seyed Roohollah *et al.* Cause-effect relationships using structural equation modeling for soil properties in arid and semi-arid regions. **CATENA**, v. 232, p. 107392, 1 nov. 2023.
- MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, p. 31–36, 1962.
- NEVES, Jorge Alexandre Barbosa. Modelo de equações estruturais: uma introdução aplicada. 2018.
- NOVAIS, R. F.; KAMPRATH, E. J. Parametros das isotermas de adsorcao de fosforo como criterio de recomendacao de adubacao fosfatada. Parte de tese. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 3, 1979.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- NOVAIS, Roberto Ferreira; SMYTH, T. Jot; NUNES, Flancer Novais. Fósforo. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa-MG: [S.n.]. p. 471–550.
- NUNES, Ana Paula Pereira; SANTOS, César Ferreira; GUELF, Douglas. Interfaces between biodegradable organic matrices coating and MAP fertilizer for improve use efficiency. **Science of The Total Environment**, v. 804, p. 149896, 15 jan. 2022.
- NUNES, Rafael de Souza *et al.* Distribution of Soil Phosphorus Fractions as a Function of Long-Term Soil Tillage and Phosphate Fertilization Management. **Frontiers in Earth Science**, v. 8, p. 350, 2 set. 2020.
- OLIVEIRA, Lara Caroline Alves De *et al.* Frações de fósforo em função do uso de fertilizantes fosfatados em distintas classes de solo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 4, p. 1–15, 2021.
- OLIVEIRA, Maiara Prates; MALAGOLLI, Guilherme Augusto; CELLA, Daltro. MERCADO DE FERTILIZANTES: dependência de importações do Brasil. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 1, p. 489–498, 2019.
- OLIVEIRA-PAIVA, C. A. *et al.* **Recomendação agrônômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho**. - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1120362/recomendacao-agronomica-de-cepas-de-bacillus-subtilis-cnpms-b2084-e-bacillus-megaterium-cnpms-b119-na-cultura-do-milho>>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- PARFITT, R. L. Anion Adsorption by Soils and Soil Materials. *In*: **Advances in Agronomy**. [S.l.]: Elsevier, 1978. v. 30 p. 1–50.
- PAULY, D. G.; MALHI, S. S.; NYBORG, M. Controlled-release P fertilizer concept evaluation using growth and P uptake of barley from three soils in greenhouse. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 82, n. 2, p. 201–210, 1 maio 2002.
- PAVINATO, Paulo S. *et al.* Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports 2020 10:1**, v. 10, n. 1, p. 1–11, 28 set. 2020.

PAVINATO, Paulo Sérgio. **Dinâmica do fósforo no solo em função do manejo e da presença de resíduos em superfície**. Tese (Doutorado em Agronomia-Agricultura)—Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 2007.

PENN, Chad; CAMBERATO, James. A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. **Agriculture**, v. 9, n. 6, p. 120, 8 jun. 2019.

PEREIRA, Suziane dos Santos. **Modelagem de Equações Estruturais no Software R**, 2013.

PESSOA-DE-SOUZA, Marco Aurélio *et al.* Comportamento químico de Nossolos Quartzarênicos em Mineiros, sudoeste goiano. **Geosciences = Geociências**, v. 34, n. 3, p. 335–347, 24 jul. 2015.

PIERZYNSKI, Gary M.; MCDOWELL, Richard W.; THOMAS SIMS, J. Chemistry, Cycling, and Potential Movement of Inorganic Phosphorus in Soils. *In*: THOMAS SIMS, J.; SHARPLEY, Andrew N. (Orgs.). **Agronomy Monographs**. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 2005. p. 51–86.

PILATI, Ronaldo; LAROS, Jacob Arie. Modelos de equações estruturais em psicologia: conceitos e aplicações. **Psicologia: Teoria e Pesquisa**, v. 23, n. 2, p. 205–216, jun. 2007.

PIZZEGHELLO, Diego *et al.* Bioactivity of Size-Fractionated and Unfractionated Humic Substances From Two Forest Soils and Comparative Effects on N and S Metabolism, Nutrition, and Root Anatomy of *Allium sativum* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1203, 14 ago. 2020.

PROCHNOW, Luíz Ignácio; ALCARDE, José Carlos; CHIEN, Sen Hsuing. Eficiência agrônômica dos fosfatos totalmente acidulados. *In*: YAMADA, Tsuioshi; ABDALLA, Silvia Regina Stipp (Eds.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba-SP: POTAFOS, 2004. p. 605–654.

R CORE TEAM. **R: O Projeto R para Computação Estatística**. ViennaR Foundation for Statistical Computing, , 2021. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 14 ago. 2025

RAFIQUE, Mazhar *et al.* Residual effects of biochar and phosphorus on growth and nutrient accumulation by maize (*Zea mays* L.) amended with microbes in texturally different soils. **Chemosphere**, v. 238, 1 jan. 2020.

RAHMAN, Mohammad A. *et al.* Soil Phosphorus Partition and Transformations Under Diverse Land Uses. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 55, n. 15, p. 2232–2247, 21 ago. 2024.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. [S.l.]: Editora Agronômica Ceres, 1991.

RAIJ, B. van. *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996.

RAIJ, B. van. Fósforo no solo e interação com outros elementos. *In*: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Eds.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato, 2004.

REDEL, Y. *et al.* Assessment of phosphorus status influenced by Al and Fe compounds in volcanic grassland soils. **Journal of soil science and plant nutrition**, n. ahead, p. 0–0, 2016.

REETZ JR, Harold F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. Paris: International Fertilizer industry Association - IFA, 2016.

REVELLE, William. **psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research**. Northwestern University, Evanston, Illinois., 2025. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=psych>>. Acesso em: 26 set. 2025

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Bras. Ci. Solo**, v. 24, p. 589–597, 2000.

RICHARDSON, A. E. Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. **Functional Plant Biology**, v. 28, n. 9, p. 897–906, 2001.

RIVAIE, A. A. *et al.* Effect of phosphate rock and triple superphosphate on soil phosphorus fractions and their plant-availability and downward movement in two volcanic ash soils under *Pinus radiata* plantations in New Zealand. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 82, n. 1, p. 75–88, set. 2008.

RODRIGUES, Marcos *et al.* Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104770, 2020.

ROLIM NETO, F. C. *et al.* Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 953–964, dez. 2004.

ROSSEEL, Yves. lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling. **Journal of Statistical Software**, v. 48, p. 1–36, 24 maio 2012.

ROY, Eric D. *et al.* The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, v. 2, n. 5, p. 16043, 18 abr. 2016.

SAENTHO, Apinya *et al.* Speciation and pH- and particle size-dependent solubility of phosphorus in tropical sandy soils. **Geoderma**, v. 408, p. 115590, fev. 2022.

SALES, Marcus Vinicius da silva. **Modelagem de equações estruturais aplicada ao estudo do ciclo do P em solos tropicais**. Campus Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2015.

SALES, M. V. S. *et al.* Respecification of structural equation models for the P cycle in tropical soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 102, n. 3, p. 347–358, 23 jul. 2015.

SALES, Marcus V. S. *et al.* Structural equation modeling for the estimation of interconnections between the P cycle and soil properties. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 109, n. 2, p. 193–207, 1 nov. 2017.

SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. Reactions of Phosphate Fertilizers in Soils. *In: ASA, CSSA, and SSSA Books*. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1980. p. 263–310.

SANTORO, Veronica; SCHIAVON, Michela; CELI, Luisella. Role of soil abiotic processes on phosphorus availability and plant responses with a focus on strigolactones in tomato plants. **Plant and Soil**, v. 494, n. 1, p. 1–49, 1 jan. 2024.

SANTOS, Danilo Rheinheimer dos; GATIBONI, Luciano Colpo; KAMINSKI, João. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 576–586, abr. 2008.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília-DF: EMBRAPA, 2025.

SANTOS, José Zilton Lopes *et al.* Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 705–714, abr. 2008.

SARKAR, Abhijit *et al.* Polymer coated novel controlled release rock phosphate formulations for improving phosphorus use efficiency by wheat in an Inceptisol. **Soil and Tillage Research**, v. 180, p. 48–62, ago. 2018.

SATO, Shinjiro *et al.* Biogenic calcium phosphate transformation in soils over millennial time scales. **Journal of Soils and Sediments**, v. 9, n. 3, p. 194–205, jun. 2009.

SCHOLZ, Roland W. *et al.* The dynamics of increasing mineral resources and improving resource efficiency: Prospects for mid- and long-term security of phosphorus supply. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 213, p. 107993, 1 fev. 2025.

SCHREIBER, James B. *et al.* Reporting Structural Equation Modeling and Confirmatory Factor Analysis Results: A Review. **The Journal of Educational Research**, v. 99, n. 6, p. 323–338, 1 jul. 2006.

SHEN, Jianbo *et al.* Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997–1005, jul. 2011.

SHEN, Jianbo *et al.* Innovations of phosphorus sustainability: implications for the whole chain. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 6, n. 4, p. 321, 2019.

SHIGAKI, Francirose. **Transporte de fósforo na enxurrada superficial em função do tipo de fonte de P e intensidade das chuvas: Relevância à gerência ambiental em sistemas de produção brasileiros**. Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 1 set. 2006.

SHREVE, Randolph Norris; BRINK, Joseph A. **Indústrias de processos químicos**. 4. ed ed. Rio de Janeiro (RJ): Guanabara, 1997.

SILVA, Erika Caitano da. **Modelagem de equações estruturais no ciclo do fósforo no solo e estratégias de aquisição em solos de diferentes pedogêneses**. Campus Goytacazes-RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2021.

SILVA, Edson Cabral Da *et al.* Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 353–362, 2005.

SILVA, F. C. **Manual De Análises Químicas De Solos, Plantas E Fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

SOUSA, Djalma Martinhão Gomes de; LOBATO, Edson. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília-DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004.

SOUZA, A. E.; FONSECA, D. S. **Fosfato**. Brasília: DNPM, , 2017.

SOUZA FILHO, Luiz Francisco da Silva. **Formas de fósforo em Latossolo sob Cerrado em função do tempo de uso agrícola**. tese de doutorado—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.

SOUZA JÚNIOR, Reginaldo Fidelis De *et al.* Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 159–170, fev. 2012.

SPARKS, Donald L. Environmental Soil Chemistry: An Overview. *In*: SPARKS, Donald L. (Org.). **Environmental Soil Chemistry (Second Edition)**. Burlington: Academic Press, 2003. p. 1–42.

SPOHN, Marie; KUZYAKOV, Yakov. Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 61, p. 69–75, jun. 2013.

STAUFFER E *et al.* **Enhanced efficiency phosphate fertilizers and phosphorus availability in Acrudox**. Disponível em: <<https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.338268665037949>>. Acesso em: 5 jun. 2023.

SUGIHARA, Soh *et al.* Soil phosphorus of stable fraction differentially associate with carbon in the tropical forest and savanna of eastern Cameroon. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 63, n. 6, p. 616–627, 2 nov. 2017.

SYERS, John K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, Denis. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008.

TAKAHASHI, Shigeru; ANWAR, Muhuddin R. Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. **Field Crops Research**, v. 101, n. 2, p. 160–171, mar. 2007.

TANG, Zhi *et al.* Mechanisms and Implications of Phosphate Retention in Soils: Insights from Batch Adsorption Experiments and Geochemical Modeling. **Water**, v. 17, n. 7, p. 998, 28 mar. 2025.

TEIXEIRA, Rafael da Silva *et al.* Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 16, n. 4, p. 1097–1112, 2016.

TIAN, Huixia *et al.* Structural Equation Modeling of Phosphorus Transformations in Soils of *Larix principis-rupprechtii* Mayr. Plantations. **Forests**, v. 14, n. 9, p. 1811, set. 2023.

TIECHER, Tales *et al.* Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 271–282, fev. 2012.

TIECHER, Tales *et al.* Cover Crops Affecting Soil Phosphorus Dynamic in Brazilian Highly Weathered Soils. *In*: REUTER, Jonah (Ed.). **Cover Crops: Cultivation, Management and Benefits**. Hauppauge, New York: Nova Science Publishers Inc, 2016.

TIESSEN, H.; MOIR, J. O. Characterization of Available P by Sequential Extraction. *In*: CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G. (Eds.). **Soil Sampling and Methods of Analysis**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. p. 293–306.

TIESSEN, Holm. Phosphorus Dynamics in Tropical Soils. *In*: THOMAS SIMS, J.; SHARPLEY, Andrew N. (Orgs.). **Agronomy Monographs**. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 2005. p. 253–262.

TOKURA, Alessandra Mayumi *et al.* Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 1, p. 9–16, 2007.

TOKURA, Alessandra Mayumi *et al.* Dinâmica das formas de fósforo em solos de textura e mineralogia contrastantes cultivados com arroz. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 171–179, 2011.

TURNER, Benjamin L.; HAYGARTH, Philip M. Phosphorus solubilization in rewetted soils. **Nature**, v. 411, n. 6835, p. 258, 2001.

VAN KAUWENBERGH, S. J. **World Phosphate Rock Reserves and Resources**. Muscle Shoals: IFDC, 2010.

VIANA, Selma Ferreira *et al.* Variabilidade espacial dos atributos químicos em terra preta de índio cultivada na região de Novo Aripuanã, AM. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 3, p. 53–58, 14 ago. 2016.

VIANA, Tarciana de Oliveira. **Frações de fósforo sob diferentes usos e classes de solo na região sul da Bahia**. Tese de doutorado—CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2016.

VIEIRA, Nilson Darlan. **Resposta da soja a fontes e doses de fósforo em solos com diferentes teores de argila**.

VOGEL, Christian *et al.* Uranium and thorium species in phosphate rock and sewage sludge ash based phosphorus fertilizers. **Journal of Hazardous Materials**, v. 382, p. 121100, jan. 2020.

VOLF, Marcelo R.; ROSOLEM, Ciro A. Soil P Diffusion and Availability Modified by Controlled-Release P Fertilizers. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 1, p. 162–172, 1 mar. 2021.

WALKER, T. W.; SYERS, J. K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, v. 15, n. 1, p. 1–19, 1976.

WANG, Yuan *et al.* Soil phosphorus availability and fractionation in response to different phosphorus sources in alkaline and acid soils: a short-term incubation study. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 5677, 7 abr. 2023.

WEIL, Ray R.; BRADY, Nyle C. **The nature and properties of soils**. Fifteenth edition, global edition ed. Harlow, England London New York: Pearson, 2017.

WITHERS, Paul J. A. *et al.* Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 2537, 7 fev. 2018.

WRIGHT, Sewall. The Method of Path Coefficients. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 5, n. 3, p. 161–215, 1934.

WU, Ping *et al.* A scientometric review of biochar research in the past 20 years (1998–2018). **Biochar** **2019** **1:1**, v. 1, n. 1, p. 23–43, 27 mar. 2019.

YI, Chenxu *et al.* Speciation of Iron and Aluminum in Relation to Phosphorus Sorption and Supply Characteristics of Soil Aggregates in Subtropical Forests. **Forests**, v. 14, n. 9, p. 1804, 4 set. 2023.

ZAMUNER, E. C.; PICONE, L. I.; ECHEVERRIA, H. E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. **Soil and Tillage Research**, v. 99, n. 2, p. 131–138, 2008.

ZAPATA, F.; ROY, R. N. **Use of phosphate rocks for sustainable agriculture**. Rome: FAO, 2004.

ZHANG, Hongzhi; SHI, Leilei; FU, Shenglei. Effects of nitrogen deposition and increased precipitation on soil phosphorus dynamics in a temperate forest. **Geoderma**, v. 380, p. 114650, 2020.

ZHANG, Shugang *et al.* Biowaste-derived, nanohybrid-reinforced double-function slow-release fertilizer with metal-adsorptive function. **Chemical Engineering Journal**, v. 450, p. 138084, 2022.

ZHAO, Wenfei *et al.* Novel Weighting Method for Evaluating Forest Soil Fertility Index: A Structural Equation Model. **Plants**, v. 12, n. 2, p. 410, 15 jan. 2023.

ZHU, Jing; LI, Min; WHELAN, Mick. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. **Science of The Total Environment**, v. 612, p. 522–537, 15 jan. 2018.

## 6. CAPÍTULO IV

### Modelos de Equações Estruturais para Descrever a Dinâmica do Fósforo em Função de Fontes e Aditivos em Distintas Classes de Solos

#### **Resumo:**

A disponibilidade de fósforo (P) em solos tropicais é resultado de processos complexos de adsorção, precipitação, mineralização e imobilização, influenciados pela mineralogia da fração argila, pela acidez e pela atividade biológica. Compreender como fontes de P e aditivos de liberação controlada interagem nesses ambientes é essencial para aprimorar a eficiência do uso de fertilizantes fosfatados. O experimento foi conduzido em casa de vegetação durante 360 dias, utilizando três classes de solos: Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo), Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf) e Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe). O delineamento foi inteiramente ao acaso em esquema fatorial  $2 \times 3 + 1$ , envolvendo duas fontes de fósforo (MAP e ST), três aditivos (sem aditivo, KimcoatBioHP<sup>®</sup> e IFCoat) e um controle, com quatro repetições. As frações inorgânicas e orgânicas de P foram determinadas pelo fracionamento sequencial de Hedley. Inicialmente, os dados foram submetidos à análise de componentes principais, que resultou em quatro agrupamentos explicando mais de 84% da variância total. Esses grupos serviram de base para a aplicação da modelagem de equações estruturais (MEE), considerando os pools orgânico, inorgânico, mineral, ocluso e disponível, além do fator tempo quando significativo. Os modelos revelaram que a dinâmica do P varia conforme as características edáficas de cada solo. No RQo, a disponibilidade foi sustentada por frações inorgânicas, mas limitada pela baixa CTC e pela lixiviação. No LVAwf, os óxidos de Fe e Al controlaram a retenção do P, com os pools oclusos atuando como fontes secundárias. Já no NVe, tanto rotas inorgânicas (ST) quanto orgânicas lábeis (MAP) sustentaram o P em solução, refletindo maior influência da ciclagem orgânica. Os aditivos poliméricos ajustaram a cinética de liberação, mas não superaram os condicionantes pedoquímicos. Assim, a MEE mostrou-se eficiente para integrar múltiplas frações e evidenciar os principais caminhos de retenção e liberação do P em solos tropicais, apoiando estratégias de manejo mais sustentáveis.

**Palavras-chave:** fósforo no solo; fracionamento de fósforo; modelagem de equações estruturais; aditivos de fertilizantes; eficiência de uso de fósforo.

#### **Abstract:**

Phosphorus (P) availability in tropical soils results from complex processes of adsorption, precipitation, mineralization, and immobilization, which are strongly influenced by clay

mineralogy, soil acidity, and biological activity. Understanding how P sources and controlled-release additives interact in these environments is essential to improve the efficiency of phosphate fertilizer use. The experiment was carried out under greenhouse conditions for 360 days using three soil classes from the Brazilian: Quartzipsamment (RQo), Acric Ferralsol (LVAwf), and Eutric Nitisol (NVe). A completely randomized design in a  $2 \times 3 + 1$  factorial scheme was adopted, with two P sources (MAP and TSP), three additive treatments (no additive, KimcoatBioHP<sup>®</sup>, and IFCoat), and one control, with four replications. Inorganic and organic P fractions were determined by the Hedley sequential fractionation, adapted for tropical soils. Initially, the data were subjected to principal component analysis, which resulted in four groups explaining more than 84% of the total variance. These groups were then used as the basis for structural equation modeling (SEM), considering the Organic, Inorganic, Mineral, Occluded, and Available pools, as well as time when significant. The models revealed that P dynamics varied according to soil properties. In RQo, availability was sustained by inorganic fractions but constrained by low cation exchange capacity and leaching. In LVAwf, Fe and Al oxides controlled P retention, with occluded pools acting as secondary sources. In NVe, both inorganic pathways (TSP) and labile organic cycling (MAP) supported P in solution, highlighting stronger microbial and organic influences. Polymeric additives modulated release kinetics but did not overcome pedochemical constraints. Overall, SEM proved effective in integrating multiple P fractions and identifying the main pathways of retention and release in tropical soils, supporting more sustainable P management strategies.

**Keywords:** soil phosphorus; phosphorus fractionation; structural equation modeling; fertilizer additives; phosphorus use efficiency.

## 6.1 Introdução

A dinâmica do fósforo (P) no solo resulta de processos complexos e interdependentes, nos quais interações químicas, físicas e biológicas modulam a disponibilidade do nutriente para as plantas (Barrow, 1983, 1986; Novais; Smyth, 1999; Weil; Brady, 2017). Em solos tropicais altamente intemperizados, como o Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf), o Neossolo Quartzarênico órtico (RQo) e o Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe), essa complexidade é ampliada pela predominância de óxidos de ferro e alumínio, pela baixa capacidade tampão em ambientes arenosos e pela elevada atividade biológica em solos mais argilosos (Novais; Smyth; Nunes, 2007; Parfitt, 1978; Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008). Nessas condições, compreender a transição entre formas lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis de fósforo é fundamental para explicar como o nutriente é retido, transformado ou disponibilizado ao longo do tempo (Barrow *et al.*, 2021; Condon; Tiessen, 2005; Walker; Syers, 1976).

Embora o fracionamento sequencial permita quantificar compartimentos específicos de P, a interpretação isolada das frações não captura integralmente as inter-relações entre pools orgânicos, inorgânicos, minerais e oclusos (Condon; Newman,

2011; Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013; Hedley; Stewart; Chauhan, 1982). Assim, a modelagem de equações estruturais (MEE) surge como ferramenta robusta para integrar essas variáveis, permitindo testar hipóteses causais e avaliar a contribuição relativa de cada compartimento para a manutenção do P em solução (Gama-Rodrigues *et al.*, 2014; Grace, 2006; Rosseel, 2012; Sales *et al.*, 2015, 2017; Tian *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2023).

Devido ao grande volume de dados obtidos, inicialmente foi realizada uma análise multivariada de agrupamento dos tratamentos com base nas frações de P em cada época de coleta, considerando componentes principais com autovalores superiores a 1 (critério de Kaiser), o que resultou em quatro componentes para todos os solos e explicou mais de 84% da variação total (Jolliffe, 2002; Kaiser, 1960). Esses agrupamentos serviram de base para a MEE, na qual as variáveis mensuradas corresponderam às frações de P determinadas pelo fracionamento sequencial, e as variáveis latentes representaram os pools de fósforo (Orgânico, Inorgânico, Mineral, Ocluso e Disponível) (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013; Hedley; Stewart; Chauhan, 1982; Sales *et al.*, 2015). O fator tempo foi incorporado nos casos em que houve ajuste linear das frações em função das datas de coleta. Após a modelagem inicial, as equações estruturais foram reespecificadas pela remoção progressiva de conexões não significativas, e os parâmetros foram estimados pelo método da máxima verossimilhança, com avaliação da qualidade de ajuste por índices como  $\chi^2$ , CFI, TLI, GFI, RMSEA, SRMR, AIC e BIC (Hu; Bentler, 1999; Kline, 2016; Schreiber *et al.*, 2006).

A integração entre análise multivariada e modelagem estrutural possibilitou comparar os três solos de forma sistêmica, revelando padrões consistentes e, ao mesmo tempo, particularidades de cada ambiente. Enquanto o RQo evidenciou limitações associadas à baixa capacidade de retenção, o LVAwf destacou o papel dos óxidos de Fe e Al, e o NVe refletiu maior influência da atividade orgânica e microbiana (Novais; Smyth; Nunes, 2007; Pavinato *et al.*, 2020; Santos; Gatiboni; Kaminski, 2008; Withers *et al.*, 2018). Em conjunto, os modelos permitiram identificar os caminhos mais relevantes para a manutenção do fósforo em solução, fornecendo subsídios para compreender a ciclagem do nutriente em solos tropicais e apoiar estratégias de manejo mais eficientes de fertilizantes fosfatados (Barrow *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2021).

## 6.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação nas dependências do IF Goiano Campus Rio Verde, pelo período de 360 dias. Foram utilizados três solos sob o

bioma Cerrado, coletados nos Estados de Goiás e Minas Gerais, sendo Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo), Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico típico (LVAw) e Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe) (Santos *et al.*, 2025), com amostras coletadas em profundidade correspondentes aos horizontes subsuperficiais de diagnóstico, sendo C2 para RQo, Bw2 para o LVAw e Bt2 para o NVe.

A correção do solo foi feita com Hidróxido de cálcio p.a. ( $PM\ 74,09\ g\ mol^{-1}$ ) incorporando o corretivo a todo o volume do solo do vaso, e sendo mantida a umidade através do peso dos vasos correspondente a 60% dos espaços porosos ocupados com água por 30 dias. A estimativa da necessidade de calagem foi realizada para aumentar a saturação de cálcio na CTC potencial a 55,21%. Após o período de incubação do solo com o corretivo, foram coletadas subamostras de cada vaso para a estimativa da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) em cada solo utilizando o ajuste da Isoterma de Langmuir (Barrow, 2015; Novais; Smyth; Nunes, 2007).

O delineamento foi inteiramente ao acaso em esquema fatorial  $2 \times 3 + 1$ , composto por duas fontes de fósforo (monoamônio fosfato – MAP: 51% de  $P_2O_5$  ou 22,3% de P e 11% de  $N-NH_4^+$  e; superfosfato triplo – ST 46% de  $P_2O_5$  ou 20,1% de P e 10% de Ca), e três tratamentos de aditivos (sem aditivo, KimcoatBioHP<sup>®</sup> e IFCoat) mais um tratamento controle (sem incubação de fonte de fósforo e aditivos), com quatro repetições. O KimcoatBioHP<sup>®</sup> é um recobrimento polimérico à base de 50%  $CaCO_3$ , 16% Ca, além de polímeros e substâncias húmicas, enquanto o IFCoat consiste em um aditivo teste elaborado com função de retardar a solubilização do fertilizante.

Cada unidade experimental foi composta por 1,5 kg de solo acondicionado em vasos de polietileno ( $3\ dm^3$ ) e mantida a 30°C. Durante os primeiros 180 dias, a umidade foi corrigida diariamente; nos 180 dias seguintes, a cada 30 dias, simulando ciclos de umedecimento e secagem equivalentes a um ano agrícola

As amostras de solo foram obtidas após a homogeneização do solo de cada unidade experimental para cada solo, aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após a instalação do experimento (DAI). Posteriormente, foram secas ao ar, peneiradas ( $< 2\ mm$ ) e acondicionadas em sacos devidamente identificados. Para o fracionamento do fósforo, utilizaram 10 g de solo, na proporção de 1:3 (solo:solução extratora).

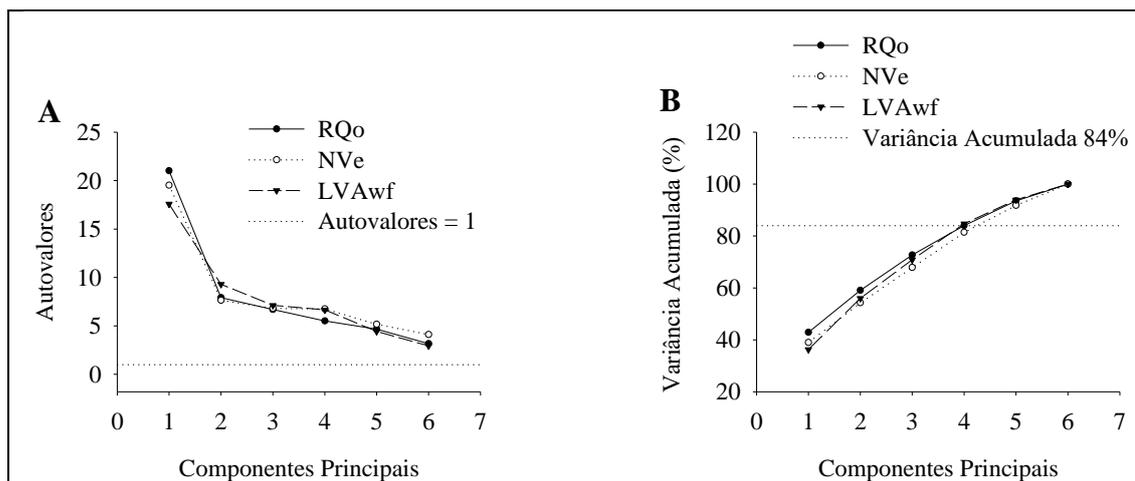
O fracionamento químico de P foi realizado pelo método sequencial de Hedley *et al.* (1982), com adaptações para solos tropicais (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013; Hedley; Stewart; Chauhan, 1982). A primeira extração com resina de troca aniônica foi

substituída por solução de cloreto de amônio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $1 \text{ mol L}^{-1}$ ). Após cada extração, adicionaram 25 mL de  $\text{NaCl}$  ( $1 \text{ mol L}^{-1}$ ), seguidos de agitação (200 rpm, 5 min) e centrifugação (4.000 g, 5 min). O sobrenadante foi descartado para reduzir teores de Ca e evitar superestimação das frações orgânicas (Po-Lábil e Po-NLábil). Essa superestimação ocorre por causa da precipitação de Ca com fosfato em meio acidificado pela adição de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  durante a precipitação de compostos orgânicos extraídos por  $\text{NaHCO}_3$  ( $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ) e  $\text{NaOH}$  ( $0,5\text{--}1 \text{ mol L}^{-1}$ ).

As frações inorgânicas do P no solo foram classificadas em: P extraído pelo  $\text{NH}_4\text{Cl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$  como P em solução (Pi-solução); P extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  em P inorgânico lábil (Pi-Lábil); P extraído pelo  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  equivalente ao P inorgânico precipitado com Fe e Al na solução do solo (Pi Fe+Al) (Costa *et al.*, 2016; Cross; Schlesinger, 1995; Klotzbücher *et al.*, 2019; Luo; Yuan; Huang, 2024; Mirabello *et al.*, 2013; Redel *et al.*, 2016); P extraído pelo  $\text{NaOH}$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  equivalente ao P inorgânico não lábil (Pi-NLábil); P extraído pelo  $\text{HCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$  em P inorgânico precipitado com Ca de diferentes espécies iônicas (Pi-Ca) e o P extraído por digestão sulfúrica,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 65% (1:1 v/v solo : solução extratora) em P inorgânico ocluso e pequenas frações de P precipitado com Ca não extraídos pelo  $\text{HCl}$  (Pi-ocluo).

As frações orgânicas foram classificadas em: P orgânico microbiano, que equivale ao P na biomassa microbiana viva, extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  + clorofórmio ( $\text{CHCl}_3$ ) em P orgânico microbiano (Po-mic); P extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  em P orgânico lábil (Po-Lábil); P orgânico extraído pelo  $\text{NaOH}$  a  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  em P orgânico moderadamente lábil (Po-MLábil) e P orgânico extraído pelo  $\text{NaOH}$  a  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  em P orgânico não lábil (Po-NLábil).

Devido ao grande volume de dados, aplicou-se análise multivariada de agrupamento dos tratamentos em cada época de coleta, com base nos componentes principais (autovalores  $> 1$ ). Foram retidos quatro componentes principais para os três solos (RQo, LVAwf e NVe), explicando mais de 84% da variação total (Figuras 1A e 1B).



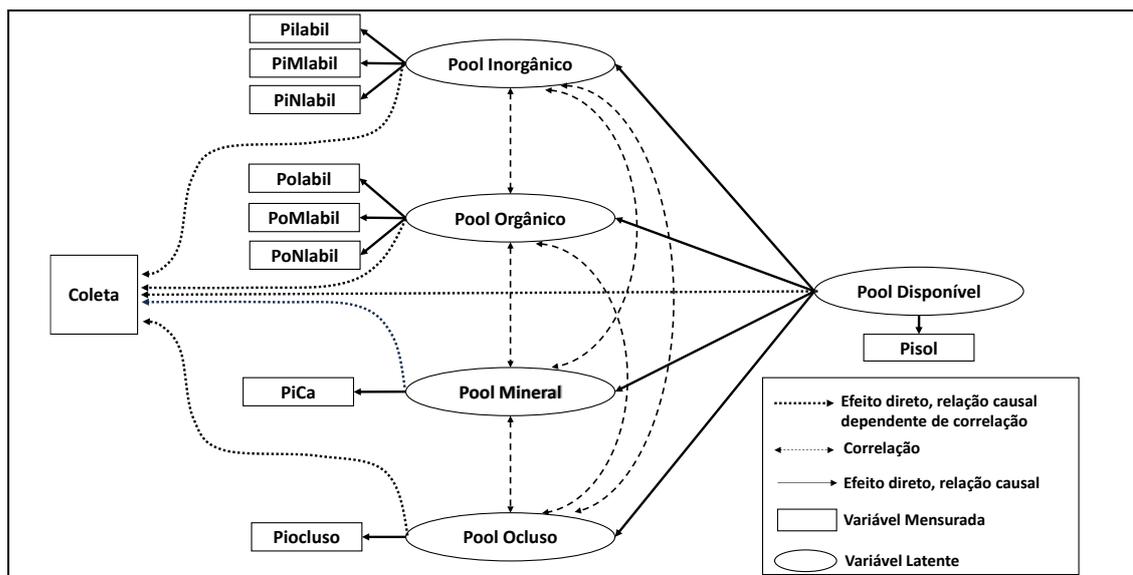
**Figura 1.** Autovalores (A) e variância acumulado (B) dos dados na análise de agrupamento por cluster.

Posteriormente, os tratamentos foram submetidos à modelagem de equações estruturais (MEE). As variáveis mensuradas (retângulos) corresponderam às frações de P. As variáveis latentes (elipses) representaram pools de P: Orgânico, Inorgânico, Mineral, Ocluso e Disponível. O tempo (dias de incubação) foi incluído nos pools que apresentaram ajuste linear (Figura 2).

A MEE, pertencente à classe dos modelos lineares generalizados, combina análise fatorial e de caminhos, permitindo avaliar a importância relativa de diferentes vias em modelos hipotéticos (Gama-Rodrigues *et al.*, 2014; Grace, 2006). A reespecificação foi feita por exclusão progressiva de conexões não significativas.

Os parâmetros foram estimados pelo método da máxima verossimilhança e os ajustes avaliados por:  $\chi^2$ , gl, p-valor, GFI, CFI, TLI, RMSEA, SRMR, além dos critérios AIC e BIC. Consideraram-se bons ajustes modelos com  $p > 0,05$  ( $\chi^2$ ),  $GFI \geq 0,95$ ,  $CFI \geq 0,90$ ,  $RMSEA$  e  $SRMR < 0,08$ , e menores valores de AIC e BIC (Byrne, 2010; Hair Jr. *et al.*, 2009).

As análises foram realizadas no R (R Core Team, 2021), com os pacotes psych (Revelle, 2025), lavaan (Rosseel, 2012), lavaanPlot (Lishinski, 2021) e SEM (Fox; Nie; Byrnes, 2024).



**Figura 2.** Modelo de equação sequencial básico da dinâmica de fósforo no solo com base nas frações de P no solo, obtido pelo método da extração sequencial de Hedley, adaptada de Gama-Rodrigues *et al.* (2014) para os dados obtidos. P inorgânico em solução (Pi-solução); P orgânico lábil (Po-Lábil), moderadamente (Po-MLábil) e não lábil (Po-NLábil); P inorgânico lábil (Pi-Lábil), precipitado com Fe e Al, (Pi-Fe +Al) e não lábil (Pi-NLábil); P inorgânico precipitado com Ca (Pi-Ca) e P inorgânico ocluso (Pi-ocluso).

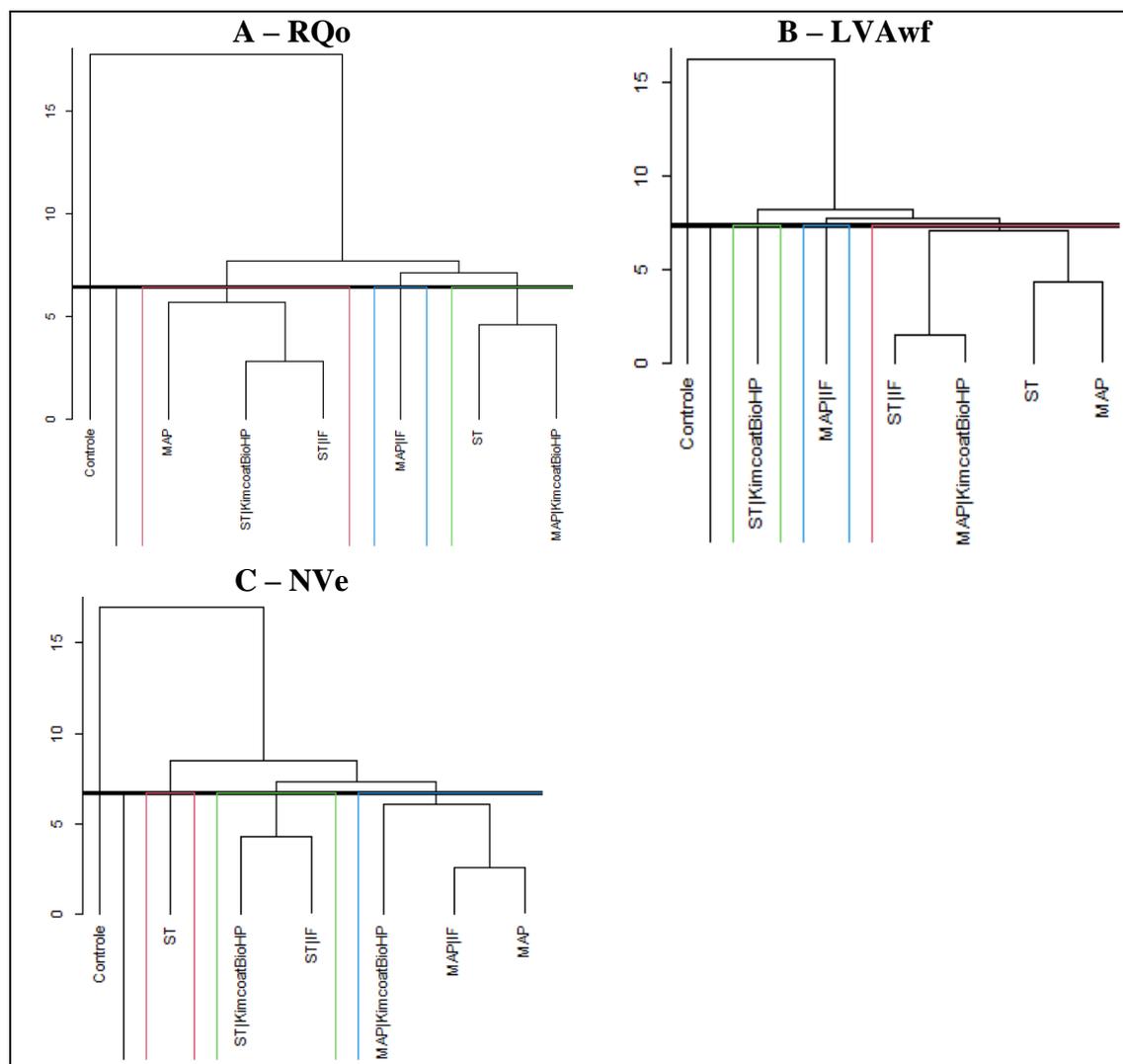
## 6.3 Resultado e Discussão

### 6.3.1 Agrupamento dos tratamentos

Os dados médios das frações de P obtidos em cada tratamento e época de avaliação são apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3 para o RQo, LVAwf e NVe, respectivamente. A análise de agrupamento (Figuras 3A, B e C) revelou contrastes expressivos entre os três solos, indicando que a dinâmica do P depende fortemente da textura e, sobretudo, da mineralogia da fração argila. O controle formou grupos isolados em todos os solos, confirmando a baixa disponibilidade natural de P nos ambientes estudados. A ação dos aditivos modulou a cinética de liberação do nutriente, aproximando o comportamento de fontes distintas. Entre as características edáficas, destacam-se a textura e, sobretudo, a mineralogia da fração argila como fatores determinantes dessa diferenciação, por controlarem os processos de adsorção, precipitação e liberação do P. Além disso, a atividade microbiana exerce papel central, modulando a disponibilidade de nutrientes e influenciando diretamente a dinâmica das frações fosfatadas.

No RQo, a análise de agrupamento permitiu identificar quatro grupos distintos entre os tratamentos (Figura 3A). O Grupo 1 foi formado exclusivamente pelo controle, evidenciando seu distanciamento em relação aos tratamentos com adição de fósforo. O Grupo 2 reuniu MAP, ST+KimcoatBioHP<sup>®</sup> e ST+IFCoat, indicando comportamento semelhante dessas combinações. O Grupo 3 foi composto apenas pelo MAP+IFCoat,

destacando-se como um tratamento com padrão específico de resposta. Já o Grupo 4 agrupou ST e MAP+KimcoatBioHP®, evidenciando convergência entre as duas combinações. O isolamento do MAP+IFCoat sugere liberação inicial acentuada, seguida de rápida imobilização em frações não lábeis, enquanto os aditivos aplicados ao ST aproximaram seu desempenho ao do MAP.



**Figura 3.** Agrupamento hierárquico em componentes principais de tratamentos com fontes de fósforo inorgânico (monoamônio fosfato – MAP e superfosfato triplo – ST), com e sem os aditivos IFCoat e KimcoatBioHP®, além do tratamento sem adubação fosfatada (Controle), em função das frações de P nos solos: Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) (A), Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf) (B) e Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe) (C). As frações de P foram obtidas pelo método de Hedley: P inorgânico em solução (Pi-solução), P inorgânico lábil (Pi-lábil), P orgânico lábil (Po-lábil), P inorgânico associado a Fe e Al (Pi-Fe+Al), P orgânico moderadamente lábil (Po-MLábil), P inorgânico não lábil (Pi-NLábil), P orgânico não lábil (Po-NLábil), P inorgânico precipitado com Ca (Pi-Ca), P inorgânico ocluído (Pi-ocluído) e P orgânico microbiano (Po-mic), avaliados aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias de incubação.

No LVAwf, a análise de agrupamento resultou na formação de quatro grupos distintos (Figura 3B). O controle também se manteve isolado formando o Grupo 1. O ST+KimcoatBioHP<sup>®</sup> (Grupo 2) e o MAP+IFCoat (Grupo 3) mostraram respostas específicas, enquanto o Grupo 4 reuniu MAP, ST, MAP+KimcoatBioHP<sup>®</sup> e ST+IFCoat, refletindo a forte influência da mineralogia do solo. A presença de óxidos de Fe e Al altamente reativos homogeneizou os efeitos das fontes e aditivos, promovendo redistribuição semelhante do P entre frações.

No NVe, também observaram quatro grupos (Figura 3C). O Grupo 1 foi formado exclusivamente pelo controle isolado. O Grupo 2 reuniu apenas o ST, refletindo o comportamento particular dessa fonte menos solúvel. O Grupo 3 agrupou ST+KimcoatBioHP<sup>®</sup> e ST+IFCoat, indicando que a adição de aditivos promoveu efeito semelhante sobre o superfosfato triplo. Por fim, o Grupo 4 foi composto pelos tratamentos à base de MAP (MAP, MAP+KimcoatBioHP<sup>®</sup> e MAP+IFCoat), evidenciando padrão comum. A maior influência da atividade orgânica e da fração argilosa nesse solo modulou a resposta, favorecendo a retenção em compartimentos orgânicos e reduzindo diferenças entre MAP recoberto e sem recobrimento.

**Tabela 1.** Valores médios ( $\bar{x}$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) das frações de P em um Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo), obtidas pelo fracionamento sequencial de Hedley (P inorgânico em solução – Pi.sol; P inorgânico lábil – Pi.Lábil; P orgânico lábil – Po.Lábil; P inorgânico precipitado com Fe e Al – Pi.Fe+Al; P orgânico moderadamente lábil – Pi.Mlábil; P inorgânico não lábil – Pi.Nlábil; P orgânico não lábil – Po.Nlábil; P inorgânico precipitado com Ca – Pi.Ca; P inorgânico ocluso – Pi.ocluso e P orgânico microbiano – Po.mic), aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação com fontes fosfatadas (MAP e ST) e aditivos (KimcoatBioHP®, IFCoat e sem aditivo).

Tratamentos		Coleta <sup>1</sup>	Pi.sol		Pi.Lábil		Po.Lábil		Pi.Fe+Al		Po.Mlábil		Pi.Nlábil		Po.Nlábil		Pi.Ca		Pi.ocluso		Po.mic	
Fertilizante	Aditivo		$\bar{x}$	$\sigma$																		
Neossolo Quartzarênico órtico típico - RQo																						
ST	IFCoat	30	0,69	0,08	11,94	1,55	0,00	0,00	17,84	1,76	0,00	0,00	17,94	3,28	11,13	13,79	2,24	2,53	466,38	22,81	0,98	0,79
		90	0,69	0,10	17,99	2,28	2,15	1,45	18,84	1,27	0,00	0,00	29,01	1,57	28,85	13,03	0,17	0,04	110,23	14,12	38,99	9,41
		180	2,14	0,49	14,90	3,77	8,05	2,91	64,07	16,92	0,00	0,00	4,73	0,21	129,85	39,99	0,48	0,13	125,74	12,71	0,00	0,00
		270	3,73	0,49	12,09	0,64	14,33	4,60	102,07	22,61	33,95	11,28	187,59	39,91	0,00	0,00	2,47	0,31	113,13	8,38	0,00	0,00
	360	3,10	0,80	162,52	8,47	0,00	0,00	72,56	11,67	0,00	0,00	6,43	2,46	0,26	0,52	2,91	0,86	556,96	87,01	0,00	0,00	
	KimcoatBioHP®	30	0,73	0,51	12,96	2,52	0,00	0,00	9,98	5,76	0,00	0,00	10,84	5,74	1,81	1,04	1,68	0,50	532,28	94,50	2,52	1,33
		90	0,51	0,13	8,79	1,91	0,22	0,18	16,90	3,82	0,00	0,00	20,20	4,94	20,10	8,66	0,30	0,09	126,79	26,90	28,88	21,23
		180	1,60	0,18	6,77	1,93	1,21	1,21	70,32	16,35	0,00	0,00	9,14	1,92	108,74	60,75	0,75	0,26	111,01	14,66	10,93	1,60
		270	1,96	0,50	13,68	1,40	0,91	0,90	32,34	4,52	9,54	1,56	148,97	78,14	0,00	0,00	2,19	0,82	120,96	10,32	8,18	4,21
	360	1,45	0,16	85,17	19,00	0,00	0,00	58,88	10,33	0,00	0,00	6,12	1,36	9,92	5,77	2,48	0,52	677,13	97,85	1,30	1,40	
	Sem	30	1,38	0,49	13,56	3,42	3,88	0,62	60,82	20,06	0,00	0,00	15,03	3,69	5,72	0,09	1,72	0,72	385,27	120,70	0,00	0,00
		90	3,44	1,05	29,79	3,27	5,96	3,12	42,71	16,52	0,00	0,00	14,00	5,38	22,24	6,19	0,08	0,02	110,23	29,97	25,28	4,79
180		3,31	0,92	11,02	3,10	0,00	0,00	80,11	12,48	0,00	0,00	7,24	1,59	173,86	51,57	1,43	1,36	126,27	7,18	5,28	2,18	
270		4,00	0,12	11,21	0,31	13,17	3,17	58,64	18,24	77,03	9,39	20,08	4,06	0,00	0,00	2,08	0,61	109,52	4,50	13,92	5,17	
360	1,75	0,31	118,29	16,23	0,00	0,00	57,47	16,78	0,00	0,00	7,04	1,07	1,23	0,58	3,52	1,57	684,67	90,44	0,00	0,00		
MAP	IFCoat	30	3,81	1,58	12,54	3,29	0,00	0,00	42,35	16,33	0,00	0,00	21,16	7,81	10,46	9,80	3,74	3,89	460,59	27,48	13,98	2,65
		90	1,12	0,39	22,22	0,81	7,34	4,68	43,77	2,11	0,00	0,00	36,18	3,03	40,48	15,82	0,02	0,02	153,70	18,67	77,81	12,73
		180	3,07	1,38	13,16	3,91	7,81	1,84	61,87	18,04	0,00	0,00	8,84	2,78	112,87	36,69	0,74	0,38	143,63	10,07	6,85	2,44
		270	3,17	1,04	12,83	1,36	7,31	0,20	19,00	2,75	44,08	17,07	10,56	1,39	0,18	0,35	1,51	0,37	120,96	11,79	16,42	3,23
	360	1,60	0,36	25,82	7,19	0,00	0,00	66,22	14,72	0,00	0,00	5,43	1,53	2,88	0,69	2,62	0,66	500,77	88,33	10,16	3,87	
	KimcoatBioHP®	30	6,04	3,73	19,36	1,14	6,14	0,31	26,97	8,82	0,00	0,00	99,58	29,50	1,90	0,43	3,18	1,27	721,30	99,34	2,86	0,56
		90	1,46	1,13	18,89	8,44	3,59	2,50	46,38	4,64	0,00	0,00	13,43	3,68	14,70	6,60	0,09	0,00	138,69	2,93	55,00	6,12
		180	2,70	0,90	10,67	2,42	7,09	2,55	93,81	14,35	0,00	0,00	11,51	2,66	210,23	33,40	1,30	0,60	113,64	9,02	10,25	4,72
		270	2,88	0,06	11,76	0,68	11,55	2,15	77,73	25,89	51,73	21,67	15,35	3,40	4,33	0,84	2,43	0,13	125,17	7,56	12,90	2,61
	360	2,32	0,17	160,66	24,63	0,00	0,00	80,31	5,98	0,00	0,00	5,74	0,68	0,00	0,00	3,01	0,76	655,20	21,59	5,45	4,25	
	Sem	30	0,96	0,80	8,46	2,51	3,43	0,16	16,70	11,25	0,00	0,00	17,98	6,09	4,82	1,94	0,95	0,34	499,69	47,86	1,18	0,52
		90	0,35	0,05	23,28	11,98	0,00	0,00	16,96	6,78	3,97	1,41	11,90	4,85	17,12	5,54	0,03	0,01	149,56	13,01	22,93	11,76
180		1,95	0,16	8,76	1,85	6,53	1,74	63,52	5,58	0,00	0,00	11,65	4,47	89,89	37,31	5,01	1,32	148,89	5,37	15,22	7,12	
270		2,99	1,97	15,76	0,54	5,79	4,33	52,53	2,81	19,16	11,41	15,98	5,07	3,13	1,33	2,32	0,34	125,17	2,25	12,77	2,91	
360	2,40	0,99	100,99	22,25	0,00	0,00	72,26	16,54	0,00	0,00	6,35	1,59	1,07	0,22	2,58	0,38	564,73	31,73	0,00	0,00		
Controle	30	0,38	0,13	0,94	0,02	0,00	0,00	2,77	0,44	0,00	0,00	7,10	0,65	0,00	0,00	0,97	0,48	438,86	81,98	1,02	0,53	
	90	0,36	0,06	7,41	2,45	0,00	0,00	3,16	0,26	0,00	0,00	9,62	0,80	23,80	14,69	0,12	0,03	104,02	17,75	9,90	3,46	
	180	0,24	0,02	0,16	0,11	1,12	0,39	7,41	1,35	1,78	0,36	2,48	0,13	32,30	2,14	0,23	0,03	141,00	3,24	6,10	0,39	
	270	0,42	0,06	1,19	0,15	1,57	0,10	5,72	0,86	6,52	0,79	4,31	0,59	0,00	0,00	0,91	0,18	104,11	2,25	0,00	0,00	
360	0,28	0,01	0,83	0,05	1,52	0,17	10,87	0,25	2,57	1,03	0,46	0,00	6,49	0,75	1,55	1,03	649,72	82,52	0,00	0,00		

<sup>1</sup>Dias após a incubação.

**Tabela 2.** Valores médios ( $\bar{x}$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) das frações de P em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf) obtidas pelo fracionamento sequencial de Hedley (P inorgânico em solução – Pi.sol; P inorgânico lábil – Pi.Lábil; P orgânico lábil – Po.Lábil; P inorgânico precipitado com Fe e Al – Pi.Fe+Al; P orgânico moderadamente lábil – Pi.Mlábil; P inorgânico não lábil – Pi.Nlábil; P orgânico não lábil – Po.Nlábil; P inorgânico precipitado com Ca – Pi.Ca; P inorgânico ocluso – Pi.ocluso e P orgânico microbiano – Po.mic), aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação com fontes fosfatadas (MAP e ST) e aditivos (KimcoatBioHP®, IFCoat e sem aditivo).

Tratamentos		Coleta <sup>1</sup>	Pi.sol		Pi.Lábil		Po.Lábil		Pi.Fe+Al		Po.Mlábil		Pi.Nlábil		Po.Nlábil		Pi.Ca		Pi.ocluso		Po.mic	
Fertilizante	Aditivo		$\bar{x}$	$\sigma$																		
Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico - LVAwf																						
ST	IFCoat	30	1,36	0,48	0,52	0,20	3,54	0,92	51,79	9,66	0,00	0,00	155,03	80,16	2,86	3,15	3,07	2,20	121,66	4,32	3,62	3,62
		90	0,42	0,05	7,87	2,29	7,03	2,66	53,85	24,36	49,36	24,53	207,37	33,35	0,00	0,00	18,83	2,77	235,71	15,20	2,16	0,73
		180	0,42	0,08	3,74	1,42	16,12	4,05	101,22	7,67	135,65	48,89	108,33	23,31	11,49	5,26	0,12	0,02	239,16	46,04	0,00	0,00
		270	2,45	0,34	4,99	2,42	3,89	0,61	108,52	21,96	60,06	12,71	231,96	39,37	26,04	9,46	0,98	0,38	408,69	68,46	0,27	0,54
	360	0,92	0,59	28,70	6,53	0,00	0,00	131,64	21,69	0,00	0,00	369,29	91,04	0,00	0,00	0,92	0,35	137,09	10,87	0,00	0,00	
	KimcoatBioHP®	30	0,83	0,32	0,55	0,28	3,59	0,47	46,20	1,50	0,00	0,00	186,95	113,65	12,15	9,00	4,53	2,27	143,68	33,62	3,26	2,12
		90	0,40	0,02	8,86	2,20	8,14	1,04	49,30	14,85	34,88	31,53	224,30	135,62	3,12	6,24	25,86	8,38	211,50	26,46	2,34	1,49
		180	0,72	0,14	7,50	0,67	18,27	2,01	127,94	6,09	15,00	23,21	125,39	8,58	4,31	1,16	1,74	2,30	246,95	34,51	0,00	0,00
		270	2,07	0,48	5,54	2,37	2,05	1,45	104,66	7,42	83,11	62,12	244,58	17,52	57,24	19,92	2,31	1,44	426,84	25,83	2,41	2,96
	360	0,51	0,08	38,73	11,88	0,00	0,00	95,11	22,93	1,67	3,34	313,06	125,65	0,00	0,00	1,37	0,44	163,31	44,51	0,35	0,57	
	Sem	30	1,28	0,67	0,89	0,70	4,01	1,85	55,23	18,90	0,00	0,00	81,56	17,77	20,33	4,54	0,44	0,38	127,17	11,92	1,40	1,62
		90	0,36	0,01	6,53	2,05	10,63	1,54	48,82	3,08	17,01	24,43	240,73	95,82	1,17	2,33	10,18	5,97	200,02	3,74	1,83	0,76
180		0,54	0,01	2,99	1,63	15,34	1,85	94,87	12,30	70,15	37,14	106,29	11,04	5,54	1,33	0,37	0,17	263,55	25,11	0,00	0,00	
270		1,78	0,31	3,23	1,07	3,60	0,91	109,94	20,19	71,01	19,58	213,14	63,95	0,00	0,00	3,03	1,54	407,24	50,64	1,08	0,92	
360	1,09	0,15	41,63	15,90	0,00	0,00	96,21	30,30	2,09	4,18	296,31	136,68	0,00	0,00	1,59	0,27	170,30	16,15	1,18	0,49		
MAP	IFCoat	30	0,91	0,10	1,64	0,55	4,69	3,04	19,85	8,80	0,00	0,00	98,94	39,21	7,80	6,49	4,00	3,56	101,97	11,75	3,07	3,04
		90	0,36	0,03	3,18	2,90	1,89	3,78	67,59	39,01	81,19	14,45	406,70	98,96	0,00	0,00	9,51	6,54	189,43	18,70	44,46	13,66
		180	0,65	0,08	6,47	2,54	2,46	1,61	109,98	6,81	59,12	9,04	148,30	33,26	4,88	1,06	0,44	0,10	258,36	33,31	0,00	0,00
		270	1,79	0,25	4,74	1,58	2,31	0,41	101,82	10,43	143,26	14,67	195,46	31,59	0,00	0,00	3,39	1,31	418,13	17,51	1,10	1,89
	360	1,60	0,24	27,14	5,23	0,00	0,00	128,72	30,25	0,00	0,00	262,99	91,67	0,00	0,00	3,16	3,00	158,06	32,89	0,00	0,00	
	KimcoatBioHP®	30	2,29	1,01	1,65	0,10	3,15	0,56	49,89	21,20	0,00	0,00	109,56	8,32	0,00	0,00	2,26	1,22	108,63	5,12	4,33	1,83
		90	0,38	0,04	9,53	7,27	5,92	4,41	51,68	7,76	26,25	40,02	268,14	15,36	0,00	0,00	6,51	4,20	182,44	11,49	2,57	0,72
		180	0,67	0,03	4,54	2,39	2,31	0,93	114,11	12,85	85,40	15,44	186,49	65,78	6,12	0,16	0,50	0,28	235,01	5,54	0,00	0,00
		270	1,95	0,22	3,70	2,27	5,95	5,48	103,66	9,84	103,86	41,24	228,69	31,96	0,00	0,00	2,08	1,47	417,40	23,14	0,14	0,20
	360	1,46	0,36	24,49	4,80	0,00	0,00	107,28	26,17	0,00	0,00	350,01	58,32	0,00	0,00	1,55	0,83	139,59	6,48	1,16	2,31	
	Sem	30	1,65	0,94	0,67	0,38	6,90	4,22	76,67	22,35	0,00	0,00	126,08	61,46	42,86	29,62	4,34	2,45	111,02	17,26	2,59	1,82
		90	0,45	0,06	6,96	1,24	13,33	6,54	48,20	1,00	57,79	18,67	179,47	11,41	0,00	0,00	4,46	0,67	212,57	8,58	2,16	1,39
180		0,67	0,07	2,17	1,76	18,01	5,36	121,79	48,76	36,04	29,78	131,40	60,35	4,91	1,91	0,96	0,66	291,56	31,96	0,00	0,00	
270		1,73	0,51	3,83	0,86	2,40	0,89	107,04	31,40	86,57	25,27	212,90	59,53	0,00	0,00	1,85	0,72	431,20	23,92	2,14	1,04	
360	1,22	0,17	17,91	3,87	0,00	0,00	128,32	28,42	13,15	26,31	416,11	159,81	0,00	0,00	1,16	0,71	144,58	7,05	0,14	0,28		
Controle	30	0,65	0,11	1,31	0,98	9,41	7,42	31,98	11,40	0,00	0,00	83,19	26,89	6,42	2,48	1,68	0,59	121,38	11,27	0,38	0,69	
	90	0,49	0,01	0,74	0,43	14,28	6,37	18,03	0,37	1,56	0,56	108,93	24,49	1,62	2,48	1,56	0,56	153,91	13,01	0,31	0,09	
	180	0,36	0,11	1,78	0,28	22,67	2,06	60,67	12,01	7,52	0,52	101,95	13,07	4,42	0,55	0,04	0,02	261,99	19,45	0,00	0,00	
	270	2,08	0,73	1,59	0,50	4,29	0,60	41,90	30,33	5,43	2,50	234,57	46,13	0,00	0,00	0,72	0,14	308,52	2,05	0,15	0,30	
360	0,53	0,10	0,54	0,25	1,57	2,46	41,46	10,49	0,00	0,00	194,17	45,09	0,00	0,00	0,46	0,07	128,60	16,89	0,36	0,54		

<sup>1</sup>Dias após a incubação.

**Tabela 3.** Valores médios ( $\bar{x}$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) das frações de P em um Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe), obtidas pelo fracionamento sequencial de Hedley (P inorgânico em solução – Pi.sol; P inorgânico lábil – Pi.Lábil; P orgânico lábil – Po.Lábil; P inorgânico precipitado com Fe e Al – Pi.Fe+Al; P orgânico moderadamente lábil – Pi.Mlábil; P inorgânico não lábil – Pi.Nlábil; P orgânico não lábil – Po.Nlábil; P inorgânico precipitado com Ca – Pi.Ca; P inorgânico ocluso – Pi.ocluso e P orgânico microbiano – Po.mic), aos 30, 90, 180, 270 e 360 dias após incubação com fontes fosfatadas (MAP e ST) e aditivos (KimcoatBioHP®, IFCoat e sem aditivo).

Tratamentos		Coleta <sup>1</sup>	Pi.sol		Pi.Lábil		Po.Lábil		Pi.Fe+Al		Po.Mlábil		Pi.Nlábil		Po.Nlábil		Pi.Ca		Pi.ocluso		Po.mic	
Fertilizante	Aditivo		$\bar{x}$	$\sigma$																		
Nitossolo Vermelho eutrófico típico - NVe																						
ST	IFCoat	30	0,59	0,15	3,05	0,35	1,40	0,39	13,05	4,30	9,05	1,34	38,84	7,07	48,53	11,04	2,17	2,73	1227,51	93,70	3,99	0,74
		90	0,64	0,07	3,80	1,40	2,91	1,21	12,00	1,34	9,37	1,47	101,73	10,64	46,50	10,48	8,98	1,82	251,92	12,50	38,37	11,98
		180	0,54	0,02	3,89	0,95	6,95	0,98	49,57	11,27	10,63	3,38	28,65	3,43	170,78	36,52	0,36	0,06	474,18	45,32	0,40	0,19
		270	1,17	0,27	4,38	0,73	5,70	0,27	34,77	3,97	56,15	7,46	106,77	22,62	28,09	6,03	2,58	1,26	202,37	17,01	2,84	1,84
	360	1,13	0,22	15,82	3,85	0,00	0,00	17,55	3,25	0,00	0,00	112,31	20,47	0,00	0,00	2,44	0,92	1697,99	168,44	0,00	0,00	
	KimcoatBioHP®	30	0,81	0,29	1,22	0,77	1,95	0,84	6,62	3,12	2,20	1,03	39,94	14,69	64,53	8,20	0,46	0,22	1155,81	105,25	0,94	0,64
		90	0,68	0,09	4,17	0,76	3,22	0,41	17,13	1,75	9,97	1,29	56,04	15,83	120,35	18,53	10,74	1,77	277,46	17,53	34,73	3,68
		180	0,54	0,09	2,25	0,79	7,27	1,30	52,12	15,41	0,00	0,00	24,99	3,64	129,18	11,49	0,60	0,19	448,69	34,30	1,08	0,76
		270	1,06	0,09	3,54	0,68	5,28	0,32	13,45	1,84	44,10	17,85	79,22	28,45	40,89	11,88	3,06	1,41	232,65	20,82	4,61	1,69
	360	0,93	0,10	4,28	0,91	5,53	1,07	20,40	4,91	6,20	2,12	131,13	26,08	0,00	0,00	1,33	0,28	1493,24	119,60	0,00	0,00	
	Sem	30	0,58	0,30	1,92	1,06	1,35	0,28	20,69	6,75	12,31	4,90	33,17	8,67	54,89	8,53	2,17	0,68	1008,08	81,83	3,12	0,72
		90	0,77	0,08	3,09	0,91	8,26	1,09	6,54	1,55	2,16	1,50	58,05	19,95	30,86	5,38	15,76	2,57	258,80	9,34	19,40	6,94
180		0,67	0,14	1,87	0,39	9,37	0,98	52,80	8,53	0,00	0,00	27,45	2,27	153,29	24,01	0,33	0,11	585,33	34,89	2,59	1,20	
270		0,97	0,18	2,07	0,72	4,99	1,10	17,94	7,09	37,51	8,09	79,08	22,59	22,11	11,72	1,46	0,58	206,09	27,61	5,73	3,08	
360	0,77	0,18	4,94	2,13	5,60	0,59	22,51	2,46	12,71	2,73	78,88	1,70	0,00	0,00	1,44	0,23	1488,24	58,77	0,57	0,35		
MAP	IFCoat	30	0,60	0,21	4,23	3,99	1,70	0,20	26,53	17,98	16,88	1,05	74,08	14,01	70,13	34,54	3,67	3,43	1270,96	79,13	0,00	0,00
		90	0,71	0,09	3,56	0,48	2,36	0,51	9,72	2,60	6,04	1,57	90,40	4,59	96,53	10,42	11,54	1,95	280,41	6,63	30,12	6,40
		180	0,45	0,05	2,85	1,24	5,58	0,78	62,15	24,41	0,00	0,00	30,60	2,85	84,41	25,92	0,45	0,12	457,87	22,21	3,40	0,63
		270	1,48	0,23	3,00	0,44	5,45	1,13	20,13	11,50	29,96	14,74	82,66	27,71	5,37	10,74	2,47	1,60	210,34	32,84	1,82	0,96
	360	0,51	0,04	4,60	1,46	6,24	1,69	23,35	6,90	3,94	0,99	81,63	13,99	1,19	2,39	2,32	1,30	1737,95	22,05	0,00	0,00	
	KimcoatBioHP®	30	0,56	0,28	4,61	1,14	1,06	0,12	18,71	2,95	3,49	0,14	130,51	37,84	77,05	71,31	2,17	1,22	1257,93	60,78	1,26	0,15
		90	0,74	0,07	3,23	0,26	2,07	0,20	7,79	0,90	13,16	1,63	53,91	17,39	57,42	36,59	9,93	5,99	268,13	23,23	26,27	10,07
		180	0,45	0,10	6,99	1,74	5,05	0,15	79,42	21,33	0,00	0,00	34,75	1,00	140,85	40,59	0,95	0,43	376,80	79,07	3,93	2,01
		270	1,12	0,30	3,18	0,74	4,86	0,54	32,25	9,69	85,29	13,59	101,99	42,38	0,61	1,22	2,31	0,69	218,84	8,86	1,40	1,70
	360	1,21	0,15	11,42	2,60	0,00	0,00	22,34	7,30	2,45	1,17	87,52	10,63	0,00	0,00	1,55	0,50	1605,60	77,93	0,00	0,00	
	Sem	30	0,49	0,16	5,18	0,62	1,71	1,64	39,11	7,57	6,31	2,62	118,47	49,60	45,34	3,33	2,92	1,30	1220,99	132,84	1,36	0,49
		90	0,75	0,12	4,13	1,09	2,48	0,36	14,92	2,72	13,47	6,55	79,07	10,79	60,97	21,17	3,87	1,78	272,55	15,91	22,10	2,86
180		0,44	0,02	3,39	1,97	7,88	1,08	66,00	22,93	0,00	0,00	30,59	2,47	101,72	8,67	0,50	0,24	491,52	10,62	1,95	1,68	
270		0,94	0,16	2,92	0,31	5,92	0,67	15,04	1,37	53,09	17,57	78,02	5,95	15,04	8,93	2,11	0,43	212,99	33,08	6,96	1,67	
360	0,59	0,17	3,67	0,51	7,16	0,23	29,09	9,59	8,81	1,80	132,89	9,68	0,00	0,00	1,21	0,37	1553,17	72,97	0,00	0,00		
Controle	30	0,35	0,09	0,47	0,08	2,36	0,35	7,05	1,81	19,59	3,94	34,33	8,65	67,03	20,53	0,92	0,21	1255,75	258,04	0,00	0,00	
	90	0,63	0,01	4,11	0,13	1,95	0,14	4,71	0,49	3,29	0,94	41,85	10,06	122,74	14,09	6,93	0,96	253,40	7,51	6,28	3,79	
	180	0,56	0,06	0,81	0,32	20,46	1,23	18,89	1,78	39,91	3,48	25,07	9,10	211,37	22,38	0,22	0,12	418,10	8,77	0,00	0,00	
	270	0,86	0,29	1,12	0,17	4,05	0,28	3,46	0,33	21,60	4,66	36,48	8,44	16,72	8,03	0,94	0,14	197,06	6,68	0,00	0,00	
360	0,47	0,19	0,73	0,12	4,29	0,62	12,08	1,73	34,65	9,79	42,77	9,92	0,00	0,00	0,66	0,07	1478,25	89,55	0,56	0,16		

<sup>1</sup>Dias após a incubação.

### 6.3.2 Modelagem de equações estruturais

Para avaliar como fertilizantes e aditivos, agrupados pela análise de cluster (Figura 3), alteraram a dinâmica do P nos três solos, foi aplicada a modelagem de equações estruturais (MEE) em formato multigrupos. No RQo, os grupos definidos foram: G1 = controle; G2 = MAP, ST+KimcoatBioHP<sup>®</sup> e ST+IFCoat; G3 = MAP+IFCoat; G4 = ST e MAP+KimcoatBioHP<sup>®</sup>. No LVAwf: G1 = controle; G2 = ST+KimcoatBioHP<sup>®</sup>; G3 = MAP+IFCoat; G4 = MAP, ST, MAP+KimcoatBioHP<sup>®</sup> e ST+IFCoat. Já no NVe: G1 = controle; G2 = ST; G3 = ST+KimcoatBioHP<sup>®</sup> e ST+IFCoat; G4 = MAP, MAP+KimcoatBioHP<sup>®</sup> e MAP+IFCoat.

Em todos os casos, o Pool Disponível (Pi-solução) foi definido como variável endógena, enquanto os Pools Orgânico (Po-Lábil, Po-MLábil, Po-NLábil), Pool Inorgânico (Pi-Lábil, Pi-Fe+Al, Pi-NLábil), Pool Mineral (Pi-Ca) e Pool Ocluso (Pi-ocluo) foram especificados como variáveis exógenas. O tempo de incubação foi incluído como covariável nos Pools com tendência linear ao longo das coletas. Essa abordagem permitiu testar a hipótese de efeitos diretos dos Pools Orgânico, Inorgânico, Mineral e Ocluso sobre o Pool Disponível, comparando diferenças entre os grupos em função da fonte e da presença de aditivos em cada solo.

Após realizar o agrupamento foi realizada a análise de normalidade multivariada pelo teste de Mardia Skewness e Mardia Kurtosis (Korkmaz; Goksuluk; Zararsiz, 2014) para todos os conjuntos de dados dos três solos (Tabela 4).

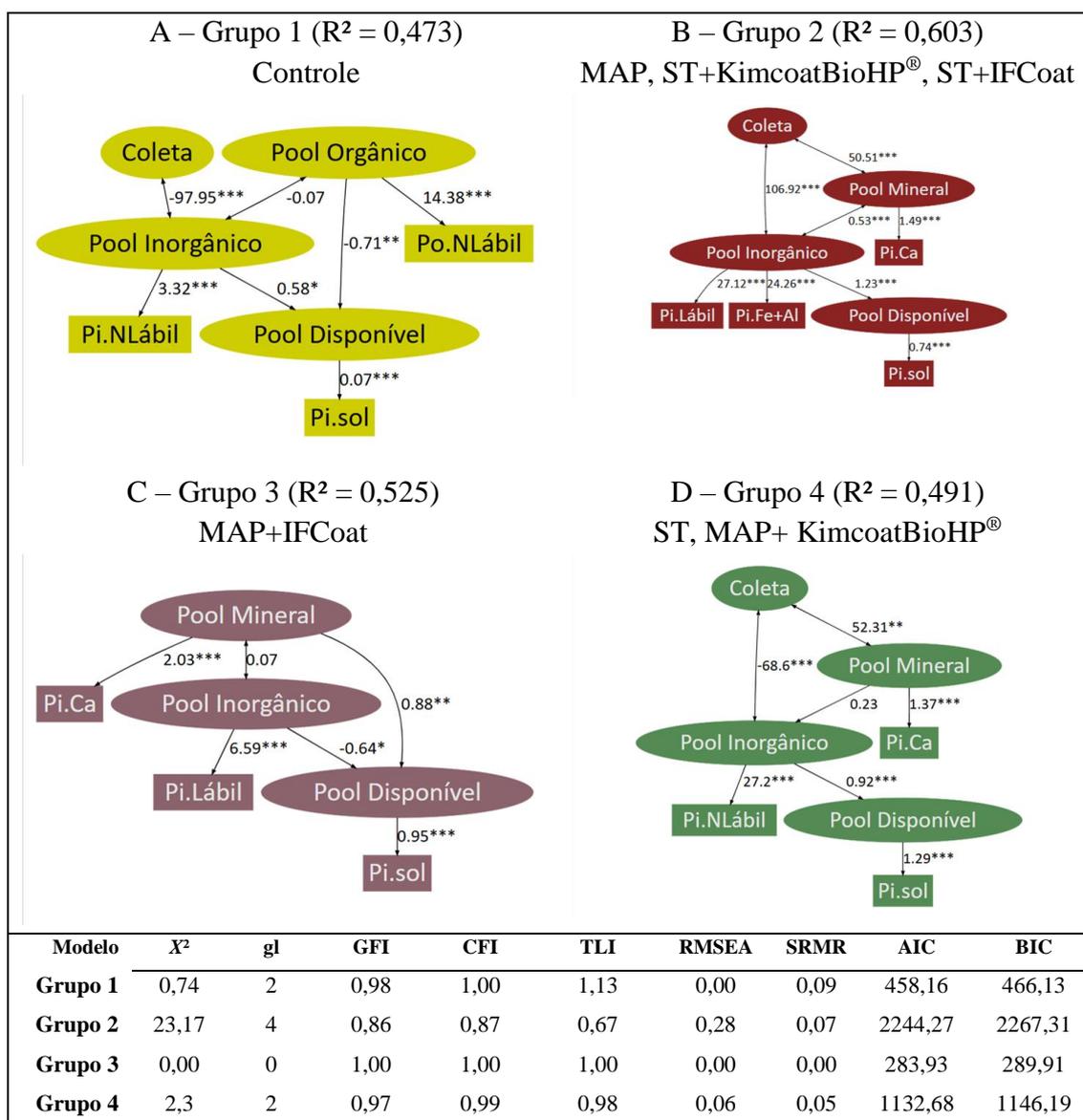
**Tabela 4.** Análise de normalidade multivariada (teste de Mardia Skewness e Mardia Kurtosis) para os conjuntos de dados no Neossolo Quartzarênico Órtico típico (RQo), Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe) e Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf).

Solo	Grupo	Conjunto de Dados	Mardia Skewness		Mardia Kurtosis	
			Teste	<i>p</i>	Teste	<i>p</i>
RQo	Grupo 1	Controle	325,986	0,052	-0,216	0,829
	Grupo 2	MAP, ST+KimcoatBioHP <sup>®</sup> , ST+IFCoat	898,927	<0,001	8,058	<0,001
	Grupo 3	MAP+IFCoat	331,389	0,033	-0,195	0,845
	Grupo 4	ST, MAP+KimcoatBioHP <sup>®</sup>	422,366	<0,001	-0,032	0,974
LVAwf	Grupo 1	Controle	348,629	0,007	0,308	0,758
	Grupo 2	ST+KimcoatBioHP <sup>®</sup>	312,287	0,137	-0,496	0,620
	Grupo 3	MAP+IFCoat	318,799	0,089	-0,407	0,684
	Grupo 4	ST, MAP, ST+IFCoat, MAP+KimcoatBioHP <sup>®</sup>	950,526	<0,001	7,481	<0,001
NVe	Grupo 1	Controle	281,923	0,557	-1,202	0,229
	Grupo 2	ST	289,046	0,439	-1,089	0,276
	Grupo 3	ST+KimcoatBioHP <sup>®</sup> , ST+IFCoat	424,487	<0,001	0,265	0,791
	Grupo 4	MAP, MAP+IFCoat, MAP+KimcoatBioHP <sup>®</sup>	582,81	<0,001	2,021	0,043

A modelagem inicial para o Grupo 1 (Controle) do Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) apresentou baixo ajuste global ( $\chi^2 = 171,0$ ; CFI = 0,54; RMSEA = 0,45), mas indicou que o Pool Inorgânico foi a principal fonte de P em solução ( $\beta = 0,61$ ;  $P < 0,05$ ) (Anexo 1A). Os Pools Orgânico e Mineral tiveram efeitos positivos, porém não significativos, enquanto o Pool Ocluso mostrou relação negativa, explicando apenas 28% da variação do Pi-solução (Anexo 1A). Esses resultados iniciais reforçam que, em solos arenosos de baixa CTC, a disponibilidade de P tende a depender fortemente das formas inorgânicas mais reativas, ainda que o ajuste do modelo não tenha sido satisfatório.

Após reespecificação, a modelagem estrutural do Grupo 1 do RQo (Controle) (Figura 4A) evidenciou que a disponibilidade de fósforo foi fortemente condicionada pelas formas inorgânicas, enquanto o pool orgânico exerceu efeito inverso sobre essa fração. O modelo apresentou excelente ajuste global, com o Pool Inorgânico contribuindo positivamente e de forma significativa para o P em solução ( $\beta = 0,42$ ;  $p = 0,026$ ), em contraste ao efeito negativo do Pool Orgânico ( $\beta = -0,52$ ;  $p = 0,010$ ). Esse comportamento sugere que, na ausência de fontes externas de P, a mineralização das frações orgânicas não foi suficiente para suprir a solução, possivelmente em função da formação de complexos orgânicos estáveis, que restringem a disponibilidade imediata do nutriente. Assim, a dinâmica do P no controle reflete a limitação imposta pelas condições edáficas do Neossolo Quartzarênico (RQo), caracterizado pela baixa capacidade de troca catiônica, reduzida fração coloidal e elevada suscetibilidade à lixiviação, em que a contribuição inorgânica, embora reduzida, representa a principal via de manutenção do P disponível (Donagemma *et al.*, 2016; Pessoa-De-Souza *et al.*, 2015).

No Grupo 2 do RQo (MAP, ST+KimcoatBioHP®, ST+IFCoat), o modelo inicial apresentou baixo ajuste ( $\chi^2 = 362,9$ ; CFI = 0,19; RMSEA = 0,40), mas confirmou novamente o protagonismo do Pool Inorgânico, principalmente via Pi-Fe+Al, como principal determinante do Pi-solução (Anexo 1B). O caminho Pool Inorgânico para Pi-solução foi positivo e altamente significativo ( $\beta = 0,74$ ;  $P < 0,001$ ), explicando 60% da variação.



**Figura 4.** Modelos completos de equações estruturais (SEM) ajustados às frações de fósforo em Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) ao longo de 360 dias de incubação, organizados em quatro agrupamentos de tratamentos (painéis A–D): (A) Controle; (B) monoamônio fosfato (MAP), superfosfato triplo recoberto com KimcoatBioHP® (ST|Kim) e com IFCoat (ST|IF); (C) monoamônio fosfato recoberto com IFCoat (MAP|IF); (D) superfosfato triplo (ST), monoamônio fosfato recoberto com KimcoatBioHP® (MAP|Kim). Para cada agrupamento, apresentam-se os diagramas estruturais completos e os respectivos índices globais de ajuste ( $\chi^2/df$ , CFI, TLI, RMSEA, SRMR, AIC e BIC). \*\*e \* = significativo a 1 e 5% pelo teste de F, respectivamente.

A reespecificação do modelo melhorou o ajuste (Figura 4B), ainda que alguns índices tenham permanecido limitados ( $\chi^2 = 23,17$ ; gl = 4;  $p < 0,001$ ; CFI = 0,868; TLI = 0,669; RMSEA = 0,283; SRMR = 0,068). Nesse arranjo, o Pool Inorgânico, sustentado por Pi-lábil e Pi-Fe+Al, manteve efeito positivo e significativo sobre o Pi-solução ( $\beta = 0,78$ ;  $P < 0,001$ ), explicando 60% da variação do P disponível. O tempo (Coleta) associou-se fortemente ao Pool Inorgânico ( $r = 0,90$ ;  $P < 0,001$ ) e ao Pool Mineral ( $r = 0,42$ ;  $P < 0,01$ ), indicando que, sob fertilização, o P disponível no RQo é controlado pela liberação

progressiva de formas inorgânicas mais ativas, em consonância com a baixa CTC e a reduzida fração coloidal desse solo, que favorecem a rápida disponibilização e a susceptibilidade à lixiviação (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013; Novais; Smyth, 1999). A presença da fração mineral (Pi-Ca), com carga elevada (1,00) e correlação positiva com o Pool Inorgânico ( $r = 0,53$ ), sugere que, em função da calagem aplicada e do aporte de Ca tanto do ST quanto do recobrimento KimcoatBioHP® (50% CaCO<sub>3</sub>; 16% Ca), parte do P foi estabilizada como fosfatos de cálcio, atuando como compartimento de transição entre a disponibilidade imediata e formas menos solúveis (Barrow, 1983; Lindsay, 1979). Nesse contexto, o uso de aditivos como KimcoatBioHP® e IFCoat associados ao ST, bem como o fornecimento direto pelo MAP, parecem modular a dinâmica do nutriente, aproximando o comportamento do ST recoberto ao MAP sem aditivos e favorecendo o equilíbrio entre liberação inicial e retenção mineral (Condrón; Tiessen, 2005; Pavinato *et al.*, 2020).

No caso do MAP recoberto com IFCoat, Grupo 3 do RQo, a modelagem inicial não convergiu, refletindo instabilidade estrutural, já que diversas cargas fatoriais foram próximas de zero (ex.: Po-lábil e Pi-lábil) e algumas variâncias negativas, indicando problemas de identificação. Ainda assim, observou-se tendência de efeito positivo do Pool Mineral (Pi-Ca) ( $\beta = 0,84$ ) e negativo do Pool Ocluso (Pi-occluso) ( $\beta = -0,42$ ), ambos sem significância estatística.

Após reespecificação, o modelo do grupo 3 do RQo (MAP+IFCoat) atingiu ajuste aceitável ( $\chi^2 = 8,5$ ; gl = 5; CFI = 0,95; RMSEA = 0,19), mas explicou apenas 29% da variação do Pi-solução (Anexo 1C). Com nova simplificação, o modelo final (Figura 4C) apresentou ajuste excelente ( $\chi^2 = 0,00$ ; gl = 0; CFI = 1,000; TLI = 1,000; RMSEA = 0,000; SRMR = 0,000), resultado característico de um modelo saturado, no qual o número de parâmetros livres é igual ao de variâncias e covariâncias observadas. Nessa condição, o teste de qui-quadrado não permite avaliar a qualidade do ajuste global, sendo a interpretação centrada nos coeficientes estimados e na coerência biogeoquímica do modelo (Hair *et al.*, 2019; Kline, 2016). O Pool Inorgânico, representado pelo Pi-lábil, e o Pool Mineral (Pi-Ca) explicaram conjuntamente 53% da variação no P disponível. O efeito do Pool Mineral sobre o Pi-solução foi positivo e significativo ( $\beta = 0,61$ ;  $P = 0,003$ ), sugerindo que a calagem favoreceu a formação de fosfatos de cálcio, os quais atuaram como compartimento de liberação gradual do nutriente (Barrow, 1983; Lindsay, 1979). Em contraste, o Pool Inorgânico exerceu efeito negativo sobre o P em solução ( $\beta = -0,44$ ;  $P = 0,016$ ), podendo indicar forte retenção das formas lábeis em um solo de baixa CTC,

em que a presença de óxidos de Fe e Al contribui para a rápida adsorção e imobilização do fósforo (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013; Novais; Smyth, 1999). Esses resultados sugerem que o recobrimento polimérico do IFCoat modulou a dinâmica de liberação do MAP, reduzindo a contribuição direta do pool inorgânico e favorecendo a transição do P para compartimentos minerais mais estáveis, representando uma estratégia potencial para mitigar perdas em solos altamente arenosos.

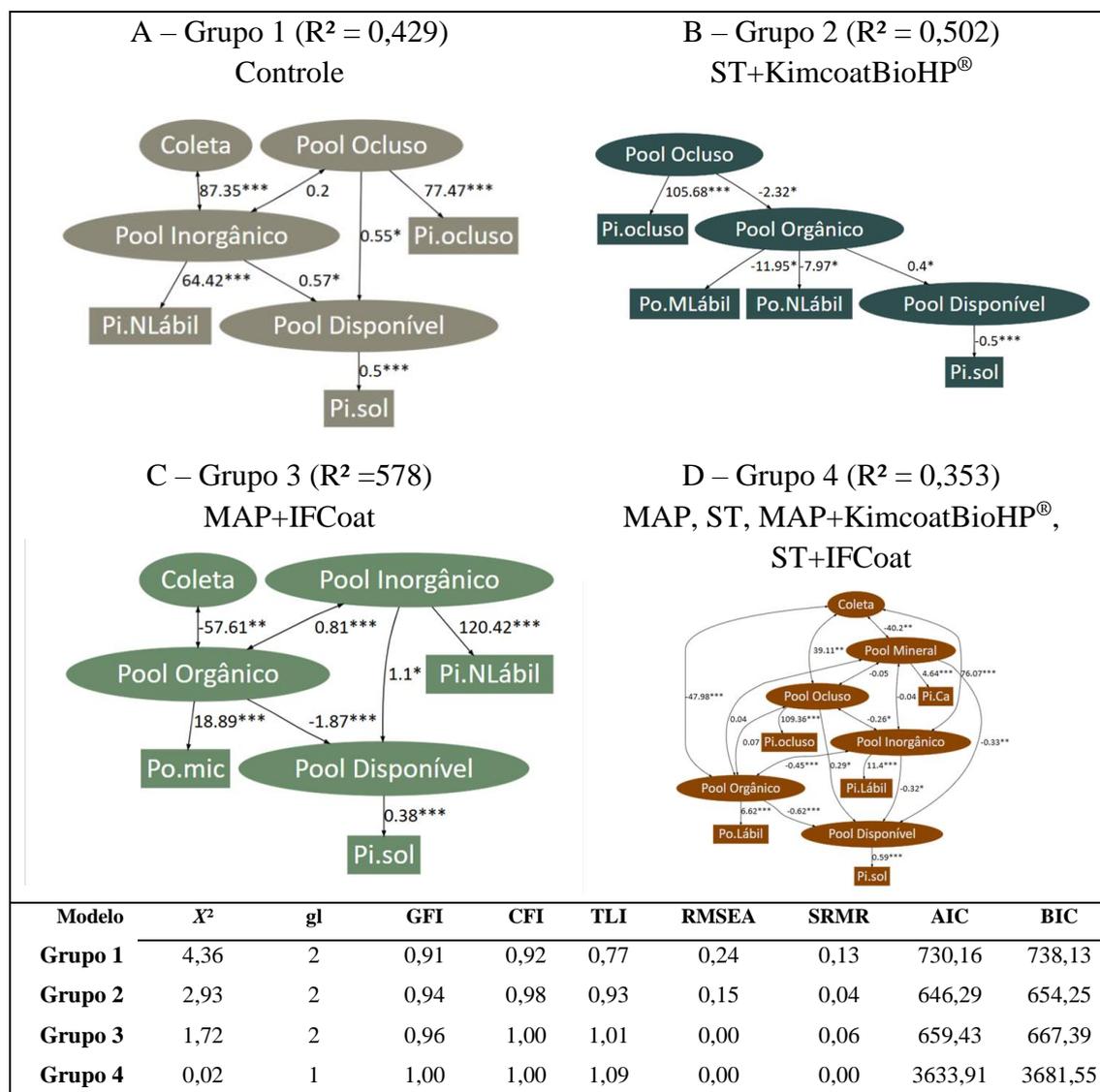
O modelo inicial para o Grupo 4 do RQo (ST, MAP+ KimcoatBioHP<sup>®</sup>) apresentou baixo ajuste global ( $\chi^2 = 192,6$ ; gl = 34; CFI = 0,50; RMSEA = 0,34), indicando inadequação da estrutura proposta (Anexo 1D). Ainda assim, destacou-se um efeito negativo e significativo do Pool Inorgânico sobre o P disponível ( $\beta = -0,74$ ;  $P < 0,001$ ), enquanto os Pools Ocluso e Mineral mostraram apenas tendências marginais de contribuição.

A modelagem estrutural reespecificada do Grupo 4 do RQo (ST e MAP+KimcoatBioHP<sup>®</sup>) apresentou ajuste satisfatório ( $\chi^2 = 2,31$ ; gl = 2;  $p = 0,314$ ; CFI = 0,994; TLI = 0,982; RMSEA = 0,063; SRMR = 0,046), indicando consistência entre a estrutura proposta e os dados observados (Figura 4D). Nesse arranjo, o Pool Inorgânico, sustentado pelo Pi-lábil, exerceu efeito positivo e significativo sobre o P disponível ( $\beta = 0,69$ ;  $p < 0,001$ ), explicando 47% da variabilidade dessa fração. Em contraste, o Pool Mineral (Pi-Ca) não apresentou efeito significativo sobre o P em solução, sugerindo que, mesmo com a calagem aplicada e, embora com o suprimento adicional de cálcio pelo ST (naturalmente rico em Ca) e pelo recobrimento KimcoatBioHP<sup>®</sup> (50% CaCO<sub>3</sub>; 16% Ca) possa ter favorecido a formação de fosfatos de cálcio, a contribuição foi secundária na manutenção da disponibilidade imediata do nutriente. A associação negativa do tempo com o Pool Inorgânico ( $r = -0,58$ ;  $p < 0,001$ ) e positiva com o Pool Mineral ( $r = 0,44$ ;  $p = 0,003$ ) reforça a tendência de declínio progressivo das formas mais lábeis e a concomitante estabilização parcial em compartimentos minerais. Esse padrão é coerente com as características edáficas do RQo, solo de baixa CTC, reduzida fração coloidal e alta suscetibilidade à lixiviação, que favorecem a rápida transformação das formas disponíveis em reservas menos acessíveis (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013; Novais; Smyth, 1999). Nesse contexto, tanto o ST quanto o MAP recoberto com KimcoatBioHP<sup>®</sup> mostraram capacidade limitada de sustentar o P em solução ao longo do tempo, evidenciando que, embora o recobrimento tenha modulado a liberação inicial, a dinâmica do P no RQo permaneceu fortemente condicionada pela rápida imobilização em formas inorgânicas.

No Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf), o modelo inicial para o Grupo 1, que compreende o tratamento controle (Anexo 3A) apresentou baixo ajuste global ( $\chi^2 = 100,1$ ;  $gl = 34$ ; CFI = 0,60; RMSEA = 0,31; SRMR = 0,25), evidenciando que a estrutura testada não foi plenamente adequada para descrever a dinâmica do P nesse solo. Ainda assim, alguns padrões puderam ser identificados: o Pool Ocluso exerceu efeito positivo e significativo sobre o P disponível ( $\beta = 0,85$ ;  $P = 0,023$ ), configurando-se como o principal determinante da fração em solução. O Pool Mineral (Pi-Ca) também apresentou contribuição positiva, embora marginal ( $\beta = 0,35$ ;  $P = 0,095$ ), enquanto o Pool Inorgânico (Pi-Fe+Al e Pi-NLábil) teve efeito positivo, porém não significativo ( $\beta = 0,39$ ;  $P = 0,109$ ). O Pool Orgânico, por sua vez, exerceu efeito negativo e não significativo ( $\beta = -0,32$ ;  $P = 0,339$ ). Apesar do baixo ajuste global, o modelo explicou 63% da variação do Pi-solução, indicando que, no LVAwf, a disponibilidade de P foi influenciada principalmente pelas frações inorgânicas mais estáveis, com destaque para o compartimento ocluso.

No Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf), o grupo Controle (Grupo 1) evidenciou uma dinâmica de fósforo (P) condicionada principalmente pelas características edáficas desse solo altamente intemperizado, marcado por elevada acidez e forte capacidade de fixação do nutriente em formas pouco disponíveis (Novais; Smyth, 1999; Pavinato *et al.*, 2020). O modelo estrutural ajustado (Figura 5A) apresentou ajuste moderado ( $\chi^2 = 4,36$ ;  $gl = 2$ ;  $p = 0,113$ ; CFI = 0,922; RMSEA = 0,243; SRMR = 0,128), refletindo limitações inerentes ao sistema sem reposição externa de P. Nessa condição, tanto o Pool Inorgânico (representado pelo Pi-NLábil) quanto o Pool Ocluso (Pi-ocluso) exerceram efeitos positivos e significativos sobre o P em solução ( $\beta = 0,43$  e  $\beta = 0,42$ , respectivamente;  $p < 0,05$ ), explicando conjuntamente 42,9% da variabilidade dessa fração. Esse resultado indica que, mesmo sem aporte externo, a disponibilidade do nutriente depende de fluxos secundários: de um lado, a liberação gradual de formas inorgânicas de menor labilidade e, de outro, a mobilização parcial de compartimentos oclusos (Condrón; Tiessen, 2005; Cross; Schlesinger, 1995). A associação significativa entre o Pool Inorgânico e o tempo ( $r = 0,73$ ;  $p < 0,001$ ) sugere que a decomposição progressiva dessas formas pouco acessíveis ao longo da incubação foi crucial para sustentar a presença residual de P em solução, coerente com o comportamento descrito em solos altamente intemperizados, nos quais a ciclagem interna é a principal via de manutenção do P biodisponível (Gama-Rodrigues *et al.*, 2014; Withers *et al.*, 2018). Assim, no cenário controle, o P disponível resulta essencialmente da transformação

interna de frações recalcitrantes, confirmando a baixa resiliência desse solo em manter níveis adequados de P sem fertilização (Roy *et al.*, 2016).



**Figura 5.** Modelos completos de equações estruturais (SEM) ajustados às frações de fósforo em Latossolo Vermelho Amarelo acriférico (LVAwf) ao longo de 360 dias de incubação, organizados em quatro agrupamentos de tratamentos (painéis A–D): (A) Controle; (B) superfosfato triplo recoberto com KimcoatBioHP® (ST|Kim); (C) monoamônio fosfato recoberto com IFCoat (MAP|IF); (D) monoamônio fosfato (MAP), superfosfato triplo (ST), monoamônio fosfato recoberto com KimcoatBioHP® (MAP|Kim) e superfosfato triplo recoberto com IFCoat (ST|IF). Para cada agrupamento, apresentam-se os diagramas estruturais completos e os respectivos índices globais de ajuste ( $\chi^2/df$ , CFI, TLI, RMSEA, SRMR, AIC e BIC). \*\*e \* = significativo a 1 e 5% pelo teste de F, respectivamente.

No Grupo 2 do LVAwf, (ST+KimcoatBioHP®) o modelo inicial (Anexo 3B) apresentou baixo ajuste global ( $\chi^2 = 143,2$ ; gl = 34; CFI = 0,46; RMSEA = 0,40), indicando inadequação da estrutura proposta. As cargas fatoriais do Pool Orgânico (Po-MLábil e Po-NLábil) foram negativas e inconsistentes, comprometendo a interpretação do modelo. Além disso, os caminhos estruturais entre os Pools e o P disponível não foram

significativos, reforçando a necessidade de reespecificação e simplificação da estrutura, com foco nas frações inorgânicas mais estáveis. Assim, embora estatisticamente inadequado, o modelo inicial do Grupo 2 indica que no LVAwf a dinâmica do P disponível não pôde ser explicada diretamente pelos pools estruturados, mas sim pela interação temporal entre compartimentos inorgânicos e pela forte oposição entre as formas orgânicas instáveis e o compartimento ocluso.

O modelo reespecificado do Grupo 2 do LVAwf (ST+KimcoatBioHP®) apresentou bom ajuste global ( $\chi^2 = 2,93$ ; gl = 2; p = 0,231; CFI = 0,978; TLI = 0,933; SRMR = 0,042), refletindo consistência entre a estrutura proposta e os dados (Figura 5B). Nesse cenário, o Pool Orgânico, sustentado pelas frações Po-MLábil e Po-NLábil, foi negativamente influenciado pelo Pool Ocluso ( $\beta = -0,92$ ; p = 0,030), sugerindo que o acúmulo de P em compartimentos recalcitrantes limitou a renovação de formas orgânicas ativas. Ainda assim, o Pool Orgânico exerceu efeito positivo sobre o P em solução ( $\beta = 0,71$ ; p = 0,050), explicando a cerca de 50% da variabilidade dessa fração. Destaca-se que o Pi-solução apresentou carga negativa no modelo ( $-0,50$ ; p < 0,001), indicando que, à medida que aumentou a contribuição do Pool Disponível, os teores observados em solução tenderam a decrescer. Essa relação inversa pode ser atribuída à natureza transitória do P em solução em solos tropicais, em que o nutriente é rapidamente imobilizado por adsorção em óxidos de Fe e Al ou consumido pela microbiota, sendo redirecionado para frações orgânicas e oclusas (Condrón; Tiessen, 2005; Novais; Smyth, 1999; Spohn; Kuzyakov, 2013). Assim, o efeito negativo não representa ausência de disponibilidade, mas sim a forte instabilidade do Pi-solução, reforçando que, sob o uso de aditivos poliméricos, a manutenção do P biodisponível depende mais do *turnover* das frações orgânicas do que da permanência direta do nutriente em solução.

O modelo inicial testado para o grupo 3 do LVAwf (MAP+IFCoat) apresentou baixo ajuste global ( $\chi^2 = 173,1$ ; CFI = 0,33; RMSEA = 0,45; SRMR = 0,32), indicando inadequação da estrutura proposta (Anexo 3C). Além dos indicadores de ajuste, observou-se instabilidade nos parâmetros, com cargas fatoriais negativas ou não significativas (e.g., Po-lábil e Po-nLábil), variâncias residuais inconsistentes (inclusive negativas para algumas frações) e ausência de significância nos caminhos estruturais que relacionam os pools ao Pi-solução. Embora o modelo tenha explicado 22,5% da variação do P disponível, os resultados sugerem que a especificação adotada não capturou adequadamente a dinâmica entre os pools de P neste grupo, tornando necessária a reespecificação do modelo para eliminar inconsistências e buscar maior parcimônia.

No LVAwf, o modelo ajustado para o Grupo 3 (MAP+IFCoat) apresentou excelente ajuste global (Figura 5C), com  $R^2 = 0,58$  para o Pool Disponível. Estruturalmente, o Pool Inorgânico exerceu efeito positivo e significativo sobre o P em solução ( $\beta \approx 0,72$ ), enquanto o Pool Orgânico teve efeito negativo e significativo ( $\beta \approx -1,22$ ). A covariância positiva entre Pool Orgânico e Pool Inorgânico sugere acoplamento entre a dinâmica microbiana (Po-mic) e o Pool Inorgânico associado a Fe/Al (processos de adsorção–dessorção), ao passo que a associação negativa entre Pool Orgânico e Coleta indica declínio temporal do Po-mic. Em termos edáficos, tais padrões são plausíveis para um LVAwf, sendo que a forte presença de óxidos de Fe/Al e a acidez favorecem sorção específica e sequestro do P recém-liberado, além disso, o revestimento IFCoat modula a liberação do MAP, atenuando picos iniciais e sustentando o Pool Inorgânico ao longo do tempo, sem eliminar a competição microbiana e a retenção típicas desses solos. Em conjunto, o modelo indica que, sob MAP+IFCoat, a disponibilidade imediata é majoritariamente suportada pelo Pool Inorgânico, coerente com a literatura de adsorção em óxidos de Fe/Al (Barrow, 1983; Parfitt, 1978) e com as limitações interpretativas do fracionamento (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013; Novais; Smyth, 1999).

No Grupo 4 do LVAwf, que compreende os tratamentos com MAP, ST, MAP+KimcoatBioHP® e ST+IFCoat, o modelo inicial (Anexo 3D) apresentou ajuste apenas moderado ( $\chi^2 = 150,9$ ; gl = 34; CFI = 0,69; TLI = 0,51; RMSEA = 0,21; SRMR = 0,18), sugerindo que a estrutura proposta não capturou adequadamente as relações entre os pools de fósforo. Entre os efeitos estimados, não foram observadas influências significativas dos pools sobre o P disponível, embora o Pool Mineral tenha apresentado tendência negativa marginal ( $\beta = -0,44$ ;  $P = 0,07$ ), indicando possível contribuição dos fosfatos de cálcio para a redução do Pi-solução. Além disso, correlações relevantes foram identificadas: o Pool Orgânico correlacionou-se positivamente com o Pool Ocluso ( $r = 0,76$ ;  $P < 0,001$ ) e negativamente com o Pool Inorgânico ( $r = -0,31$ ;  $P = 0,028$ ), sugerindo caminhos competitivos de alocação do P entre formas orgânicas e inorgânicas mais estáveis. O modelo explicou 61% da variação do P disponível, mas a presença de cargas fatoriais inconsistentes — como valores não significativos para Po-NLábil e Po-mic — indica limitações na representatividade do Pool Orgânico.

O modelo reespecificado para o Grupo 4 do LVAwf (MAP, ST, MAP+KimcoatBioHP®, ST+IFCoat) apresentou excelente ajuste global (Figura 5D). O Pool Disponível foi negativamente influenciado pelos Pools Orgânico ( $\beta = -0,50$ ), Inorgânico ( $\beta = -0,26$ ) e Mineral ( $\beta = -0,26$ ), e positivamente pelo Pool Ocluso ( $\beta = +0,24$ ),

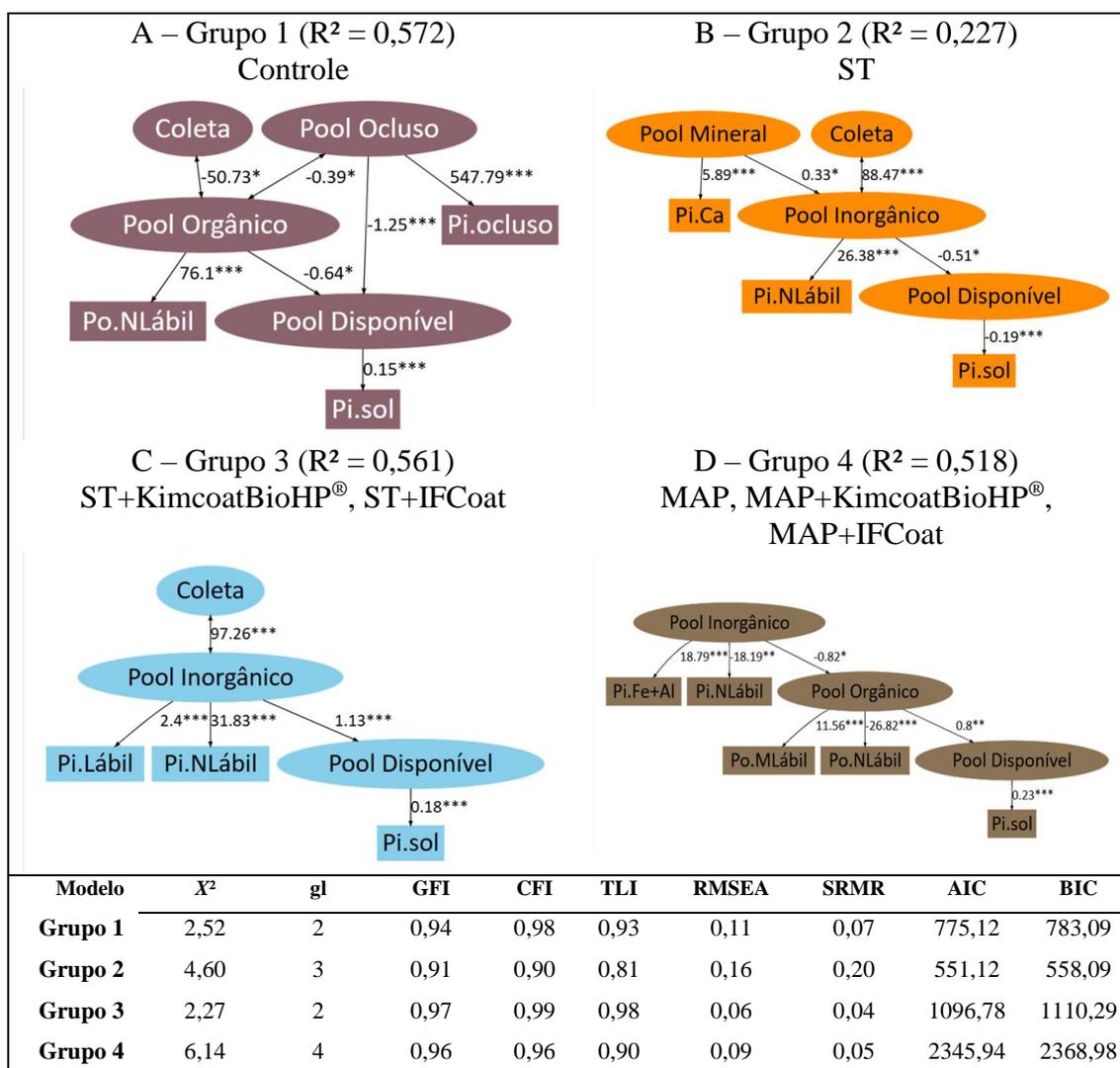
com  $R^2=0,35$ . As covariâncias com o tempo (Coleta) indicaram aumento de Inorgânico e Ocluso e queda de Orgânico e Mineral, sugerindo redistribuição progressiva do P de formas mais reativas para reservatórios menos acessíveis (adsorção específica/occlusão), fenômeno clássico de “legado de P” em solos ricos em Fe/Al (Pavinato *et al.*, 2020). As correlações negativas entre “Orgânico e Inorgânico” e entre “Inorgânico e Ocluso” reforçam competição e sequestro entre pools. Esse resultado é compatível com imobilização microbiana e controle enzimático da liberação de P (atividade de fosfatases), que nem sempre sustentam o P em solução (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013; Spohn; Kuzyakov, 2013). Em termos pedoquímicos, mesmo com fontes e revestimentos distintos (MAP, ST, KimcoatBioHP<sup>®</sup>, IFCoat), a mineralogia com óxidos de Fe e Al do LVAwf mantém forte controle sobre a disponibilidade imediata via sorção específica e oclusão, sendo que o efeito negativo do Pool Mineral é compatível com a formação/dissolução transitória de fosfatos de Ca (ST) seguidos de readsorção em Fe/Al (Novais; Smyth, 1999). Em conjunto, o modelo indica que os revestimentos modulam a cinética de liberação, mas não superam o controle imposto pelos óxidos de Fe/Al e pela formação de legado de P, o que ajuda a explicar a limitação persistente da disponibilidade no LVAwf (Novais; Smyth, 1999; Pavinato *et al.*, 2020; Spohn; Kuzyakov, 2013).

O primeiro modelo testado para o Grupo 1 no NVe (Controle) apresentou baixo ajuste estatístico (Anexo 5A), com valores de  $\chi^2 = 180,1$ ;  $gl = 34$ ; CFI = 0,47; TLI = 0,15; RMSEA = 0,46; SRMR = 0,22, indicando inadequação global da estrutura proposta. Além disso, a variância explicada para o P disponível foi praticamente nula ( $R^2 = 0,4\%$ ), sugerindo que as relações estruturais especificadas não representaram de forma consistente a dinâmica do fósforo nesse grupo. Embora algumas cargas fatoriais tenham sido significativas, como Po-mlábil (0,81) e Pi-lábil (0,90), outras apresentaram sinais negativos ou inconsistentes, destacando problemas de convergência interpretativa, especialmente nos Pools orgânico e inorgânico. Adicionalmente, a matriz de covariâncias dos fatores latentes não foi positiva definida, reforçando a fragilidade do modelo. Em síntese, esse arranjo inicial evidenciou forte inadequação estatística e conceitual, justificando a necessidade de reespecificação para melhor captar os processos que controlam a disponibilidade de P no NVe.

No Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe), o modelo ajustado para o Grupo 1 (Controle) apresentou bom ajuste global (Figura 6A). Embora o RMSEA esteja acima do ideal, trata-se de uma métrica sensível a poucos graus de liberdade; assim, a convergência dos demais índices sustenta a adequação do modelo. Estruturalmente, o Pool Disponível

foi negativamente influenciado pelo Pool Ocluso ( $\beta=-0,82$ ;  $p=0,001$ ) e pelo Pool Orgânico ( $\beta=-0,42$ ;  $p=0,023$ ), explicando 57% da variância do P em solução. A covariância negativa entre Pool Orgânico e Coleta ( $-0,43$ ) indica declínio temporal do Po, sugerindo que a mineralização não sustentou a manutenção do P disponível; por sua vez, a covariância negativa entre Pool Orgânico e Pool Ocluso ( $-0,40$ ) é consistente com a imobilização e o aprisionamento do P em formas menos acessíveis. Tais resultados refletem a natureza argilosa e a maior presença de óxidos de Fe e Al do NVe, nos quais a adsorção específica e processos de oclusão tendem a sequestrar o P e reduzir a fração lábil, sobretudo na ausência de reposição externa de P (Controle) (Barrow, 1983; Novais; Smyth, 1999; Parfitt, 1978). Além disso, nem todo Po se converte prontamente em P disponível, e a leitura das frações deve considerar as limitações e dinâmicas temporais (Gatiboni; Brunetto; Kaminski, 2013). Em conjunto, o modelo indica que, no NVe sem adubação, a disponibilidade de P é majoritariamente limitada por sorção/occlusão e por um aporte orgânico insuficiente para compensar perdas do P lábil, coerente com a literatura clássica para solos tropicais argilosos ricos em Fe/Al.

A primeira modelagem realizada para o Grupo 2 no NVe (Anexo 5B) apresentou sérias inconsistências estatísticas e conceituais, inviabilizando a interpretação. Os índices de ajuste global (CFI = 0,51; TLI = 0,12; RMSEA = 0,44; SRMR = 0,21) indicaram inadequação do modelo, enquanto as estimativas revelaram cargas fatoriais negativas ou infladas, variâncias impossíveis (casos de Heywood) e regressões sem significância estatística. Além disso, observou-se um coeficiente de determinação artificialmente elevado para o Pool Disponível ( $R^2 = 0,99$ ), sinalizando problemas de identificação. Esses resultados evidenciam que a estrutura proposta não representa de forma confiável a dinâmica das frações de P nesse grupo, sendo necessária a reespecificação do modelo com simplificação das relações estruturais e exclusão de frações problemáticas.



**Figura 6.** Modelos completos de equações estruturais (SEM) ajustados às frações de fósforo em Nitisossolo Vermelho eutrófico típico (NVe) ao longo de 360 dias de incubação, organizados em quatro agrupamentos de tratamentos (painéis A–D): (A) Controle; (B) superfosfato triplo (ST); (C) superfosfato triplo recoberto com KimcoatBioHP® (ST|Kim) e com IFCoat (ST|IF); (D) monoamônio fosfato (MAP), monoamônio fosfato recoberto com KimcoatBioHP® (MAP|Kim) e com IFCoat (MAP|IF). Para cada agrupamento, apresentam-se os diagramas estruturais completos e os respectivos índices globais de ajuste ( $\chi^2/df$ , CFI, TLI, RMSEA, SRMR, AIC e BIC). \*\*e\* = significativo a 1 e 5% pelo teste de F, respectivamente.

No Grupo 2 do Nitisossolo Vermelho eutrófico (ST), o modelo estrutural escolhido (Figura 6B) evidenciou que o Pool Mineral (Pi-Ca) exerceu efeito positivo sobre o Pool Inorgânico (Pi-NLábil) ( $\beta = 0,317$ ), refletindo a dissolução parcial do superfosfato triplo e sua transformação em formas menos lábeis do nutriente. O fosfato de cálcio tende a se converter em precipitados mais estáveis em solos ácidos, principalmente como fosfatos de ferro e alumínio (Alcarde, 2007; Oliveira *et al.*, 2021). No entanto, a relação negativa observada entre o Pool Inorgânico e o P disponível em solução ( $\beta = -0,476$ ) sugere que o acúmulo de Pi-NLábil representa um dreno de P potencialmente disponível para as plantas, apontando a fixação progressiva como o principal limitante à eficiência do uso

de fertilizantes fosfatados. Assim, o modelo confirma que, embora o ST contribua inicialmente para o suprimento do P inorgânico no solo, a maior parte desse aporte é rapidamente retida em formas não lábeis, restringindo a disponibilidade imediata e reforçando a necessidade de estratégias que reduzam a precipitação e fixação do nutriente.

A primeira modelagem do grupo 3 no NVe (Anexo 5C) apresentou baixo ajuste estatístico ( $\chi^2 = 232,47$ ; gl = 34; CFI = 0,473; RMSEA = 0,382; SRMR = 0,244), evidenciando inconsistências na representação estrutural das frações de fósforo. Embora as cargas fatoriais para os pools latentes estivessem bem definidas, alguns parâmetros exibiram sinais inesperados ou efeitos não significativos, como o Po-mic ( $\beta = -0,07$ ;  $p = 0,47$ ), indicando instabilidade ao integrar as frações orgânicas. Além disso, os caminhos de regressão entre os pools e o P disponível não foram significativos, com coeficientes próximos de zero e elevados erros-padrão, reforçando a ausência de suporte estatístico e ecológico para essa estrutura. Do ponto de vista biogeoquímico, o fraco desempenho pode estar associado à própria composição do grupo, que reúne o superfosfato triplo (ST) — fonte predominantemente de fosfatos de cálcio de rápida precipitação — e suas versões recobertas (KimcoatBioHP® e IFCoat), responsáveis por uma liberação mais gradual do nutriente. A coexistência desses mecanismos distintos tende a gerar heterogeneidade entre as frações, dificultando a captura de relações lineares estáveis no modelo. Assim, esta configuração deve ser considerada apenas como uma tentativa exploratória, servindo de base para ajustes mais parcimoniosos e ecologicamente consistentes nas etapas subsequentes.

No Grupo 3 (ST+KimcoatBioHP® e ST+IFCoat) do NVe, o modelo estrutural selecionado (Figura 6C) apresentou excelente ajuste e revelou que o P disponível em solução foi sustentado de forma significativa pelo Pool Inorgânico ( $\beta = 0,749$ ;  $p < 0,001$ ), formado principalmente pelas frações Pi-lábil e Pi-nLábil. Essa relação indica que os revestimentos atuaram de maneira efetiva em modular a liberação do fósforo proveniente do superfosfato triplo, reduzindo as perdas imediatas por fixação e prolongando a contribuição das formas inorgânicas para o Pi-solução ao longo do tempo. O efeito positivo da Coleta sobre o Pool Inorgânico ( $r = 0,817$ ;  $p < 0,001$ ) reforça esse comportamento, evidenciando que a liberação gradual promovida pelos aditivos manteve a disponibilidade do nutriente mesmo em um solo de elevada capacidade tampão como o NVe, caracterizado por alto teor de argila e abundância de óxidos de Fe e Al (Barrow, 1983; Novais; Smyth, 1999; Withers *et al.*, 2018). Assim, a aplicação do ST associado a KimcoatBioHP® e IFCoat mostrou-se estratégica para retardar a precipitação e adsorção

do fósforo, favorecendo a manutenção do Pi-solução e indicando maior potencial de eficiência agrônômica do fertilizante sob condições tropicais de forte interação do P com a matriz mineral do solo.

A primeira modelagem aplicada ao Grupo 4 do NVe (Anexo 5D) apresentou baixo ajuste estatístico ( $\chi^2 = 208,91$ ; gl = 25; CFI = 0,385; RMSEA = 0,350; SRMR = 0,196), indicando fragilidade na representação estrutural das frações de P. Embora algumas variáveis latentes tenham se mostrado significativas, como Po-Nlável ( $\beta = 0,40$ ;  $p < 0,01$ ) e Po-mic ( $\beta = 0,84$ ;  $p < 0,01$ ) no Pool Orgânico, outras exibiram sinais inesperados ou ausência de significância, como Po-lável ( $\beta = -0,24$ ;  $p = 0,066$ ) e Po-mlável ( $\beta \approx 0$ ;  $p = 0,94$ ). Além disso, no Pool Inorgânico, o Pi-lável não apresentou contribuição estatisticamente relevante, e o Pi-Nlável exibiu comportamento inconsistente, sugerindo problemas de identificação. Os caminhos estruturais entre os pools e o P disponível não foram significativos, com coeficientes próximos de zero. Sob a ótica biogeoquímica, esses resultados podem estar ligados à própria composição do grupo. O MAP é uma fonte altamente solúvel, fornecendo P prontamente disponível, enquanto os recobrimentos (KimcoatBioHP® e IFCoat) modulam a liberação gradual do nutriente. Essa combinação tende a gerar heterogeneidade entre os compartimentos de P, refletida em correlações instáveis e cargas fatoriais divergentes. Assim, a baixa qualidade de ajuste não decorre apenas do excesso de parâmetros no modelo, mas também da complexidade inerente à interação entre liberação imediata (MAP) e liberação controlada (MAP recoberto). Portanto, essa estrutura inicial deve ser entendida como exploratória, servindo de base para simplificações posteriores que capturem de forma mais parcimoniosa as interações dominantes no ciclo do fósforo nesse grupo.

No Grupo 4 (MAP, MAP+KimcoatBioHP® e MAP+IFCoat) do NVe, a Modelagem escolhida (Figura 6D) apresentou ajuste adequado ( $\chi^2 = 6,14$ ; gl = 4;  $p = 0,189$ ; CFI = 0,961; TLI = 0,903; RMSEA = 0,094; SRMR = 0,055) e mostrou que o P em solução foi mantido principalmente via rota orgânica lábil, em que a relação entre o Pool Orgânico e o Pi-solução foi positivo e significativo ( $\beta = 0,720$ ;  $p = 0,003$ ), explicando 52% da variância do Pi-solução ( $R^2 = 0,518$ ). Na mensuração, Po-mLável carregou positivamente o Pool Orgânico ( $\lambda = 0,628$ ), enquanto Po-nLável carregou negativamente ( $\lambda = -0,699$ ), indicando que a mineralização do P orgânico mais lábil favoreceu a disponibilidade, ao passo que o direcionamento para formas orgânicas mais recalcitrantes atuou no sentido oposto. O Pool Inorgânico, composto por Pi-Fe+Al ( $\lambda = 0,797$ ) e Pi-nLável ( $\lambda = -0,489$ ), apresentou efeito antagônico sobre o Pool Orgânico ( $\beta =$

-0,632;  $p = 0,025$ ), apontando para um equilíbrio dinâmico em que maior estabilização por Fe/Al reduz a contribuição da ciclagem orgânica ao Pi-solução. Em termos pedológicos, esse padrão é coerente com o NVe, solo argiloso, de alta capacidade tampão e abundante em Fe/Al, no qual o P do MAP tende a interagir rapidamente com a matriz mineral, enquanto os revestimentos (KimcoatBioHP® e IFCoat) modulam a liberação, sincronizando a oferta com a mineralização orgânica e reduzindo a fixação imediata (Barrow, 1983; Condrón; Tiessen, 2005; Gama-Rodrigues *et al.*, 2014; Novais; Smyth, 1999).

#### 6.4 Conclusão

A modelagem de equações estruturais aplicada aos três solos permitiu integrar frações inorgânicas e orgânicas de fósforo, revelando que a dinâmica do nutriente é fortemente condicionada pelas características edáficas. No RQo, a disponibilidade de P esteve associada principalmente às frações inorgânicas, com forte influência da baixa CTC e da suscetibilidade à lixiviação. No LVAwf, os óxidos de Fe e Al determinaram a rápida imobilização e redistribuição do P entre compartimentos, destacando o papel dos pools oclusos como fontes secundárias. No NVe, a atividade microbiana e as interações orgânico-inorgânicas exerceram maior influência, modulando o equilíbrio entre formas lábeis e não lábeis. A utilização de aditivos como KimcoatBioHP® e IFCoat modificou a cinética de liberação dos fertilizantes, aproximando o comportamento de fontes distintas e contribuindo para reduzir perdas imediatas. Assim, a MEE mostrou-se uma ferramenta eficiente para integrar múltiplos processos, evidenciar diferenças entre classes de solos e apontar caminhos relevantes para o manejo mais sustentável do fósforo em ambientes tropicais.

## REFERÊNCIAS

- ACHARY, V. Mohan M. *et al.* Phosphite: a novel P fertilizer for weed management and pathogen control. **Plant Biotechnology Journal**, v. 15, n. 12, p. 1493–1508, 2017.
- ALCARDE, José Carlos. Fertilizantes. *In*: NOVAIS, Roberto Ferreira *et al.* (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa-MG: SBCS, 2007. p. 737–768.
- ALI, N. S.; AL-JUTHERY, H. W. A. The application of nanotechnology for micronutrient in agriculture production (review article). **Iraqi Journal of Agricultural Sciences**, v. 48, n. 4, 13 ago. 2017.
- ALLEONI, Luis Reynaldo Ferracciú *et al.* Química dos solos altamente intemperizados. **Química e mineralogia do solo. v. 2: aplicações**, p. 685 il, 2016.
- ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. *In*: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Orgs.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba/SP: POTAFOS, 2004. p. 537–562.
- ARAÚJO, Brilhar *et al.* **Solubilização de fosfatos e potássio por bactérias rizosféricas uma revisão.** |EBSCOhost. Disponível em: <<https://openurl.ebsco.com/contentitem/doi:10.31413%2Fnat.v12i4.17576?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:doi:10.31413%2Fnat.v12i4.17576>>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- ARENBERG, Mary R.; LIANG, Xinqiang; ARAI, Yuji. Immobilization of agricultural phosphorus in temperate floodplain soils of Illinois, USA. **Biogeochemistry**, v. 150, n. 3, p. 257–278, 2020.
- ASHRAF, M. N. *et al.* Evaluating Organic Materials Coating on Urea as Potential Nitrification Inhibitors for Enhanced Nitrogen Recovery and Growth of Maize (*Zea mays*). **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 22, n. 5, p. 1102–1108, 2019.
- AUDETTE, Yuki *et al.* Phosphorus binding to soil organic matter via ternary complexes with calcium. **Chemosphere**, v. 260, p. 127624, 1 dez. 2020.
- AZIZ, Tariq *et al.* Phosphorus deficiency in plants: Responses, adaptive mechanisms, and signaling. **Plant Signaling: Understanding the Molecular Crosstalk**, v. 9788132215424, p. 133–148, 1 out. 2014.
- BAI, Yong-Chao *et al.* Soil Chemical and Microbiological Properties Are Changed by Long-Term Chemical Fertilizers That Limit Ecosystem Functioning. **Microorganisms**, v. 8, n. 5, p. 694, 8 maio 2020.
- BALDOTTO, Maribus Altoé; VELLOSO, Ary Carlos Xavier. Eletroquímica de solos modais e de sua matéria orgânica em ambientes tropicais. **Revista Ceres**, v. 61, n. 6, p. 1012–1021, 2014.
- BARBOSA, Kássia de Paula. Fontes e formas de aplicação de fertilizantes fosfatados em cultivos consecutivos de soja em Latossolo de alta fertilidade. nov. 2020.

BARROW, N. J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. **Journal of Soil Science**, v. 34, n. 4, p. 733–750, 1983.

BARROW, N. J. Reaction of Anions and Cations with Variable-Charge Soils. *In: Advances in Agronomy*. [S.l.]: Elsevier, 1986. v. 38 p. 183–230.

BARROW, N. J. Soil phosphate chemistry and the P-sparing effect of previous phosphate applications. **Plant and Soil**, v. 397, n. 1–2, p. 401–409, 2015.

BARROW, N. J. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. **Plant and Soil**, v. 410, n. 1–2, p. 401–410, 2017.

BARROW, N. J. *et al.* The soil phosphate fractionation fallacy. **Plant and Soil**, v. 459, n. 1–2, p. 1–11, 1 fev. 2021.

BASINSKI, Jade J. *et al.* Unraveling iron oxides as abiotic catalysts of organic phosphorus recycling in soil and sediment matrices. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 5930, 18 jul. 2024.

BAZANI, José Henrique. **Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto**. Mestrado em Recursos Florestais—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.

BENNETT, Elena M.; SCHIPANSKI, Meagan E. Chapter 8 - The Phosphorus Cycle. *In: WEATHERS, Kathleen C.; STRAYER, David L.; LIKENS, Gene E. (Orgs.). Fundamentals of Ecosystem Science*. [S.l.]: Academic Press, 2013. p. 159–178.

BOLAN, N. S.; WHITE, R. E.; HEDLEY, M. J. A Review of The Use of Phosphate Rocks As Fertilisers For Direct Application in Australia and New Zealand. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 30, n. 2, p. 297–313, 1990.

BOOMSMA, Anne. Structural Equation Modeling: Foundations and Extensions (Advanced Quantitative Techniques in the Social Sciences Series, Vol. 10.) by David Kaplan. **Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal**, v. 10, n. 2, p. 323–331, abr. 2003.

BORGES, W. L. *et al.* Agronomic efficiency of fertilizers with aggregate technology in the Brazilian Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 18, n. 4, p. 1–7, 31 dez. 2023.

BOWMAN, R. A.; VIGIL, M. F. Soil testing for different phosphorus pools in cropland soils of the Great Plains. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 57, n. 6, p. 479–485, nov. 2002.

BRADY, Nyle C.; WEIL, Ray R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. [S.l.]: Bookman, 2013.

BRAOS, L. B. *et al.* Dynamics of phosphorus fractions in soils treated with dairy manure. **Soil Research**, v. 58, n. 3, p. 289–298, 20 jan. 2020.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 14, n. 4, p. 319–329, 1 jan. 1982.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Phosphorus in the soil microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 16, n. 2, p. 169–175, jan. 1984.

BÜNEMANN, E. K. *et al.* Rapid microbial phosphorus immobilization dominates gross phosphorus fluxes in a grassland soil with low inorganic phosphorus availability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 51, p. 84–95, ago. 2012.

BYRNE, Barbara M. **Structural equation modeling with AMOS: basic concepts, applications, and programming**. Second edition (Online-Ausg.) ed. New York: Routledge, 2010.

CAIONE, Gustavo; PRADO, Renato de Mello. **Nutrição e adubação de pastagens**. [S.l.]: Fcav, 2021.

CALHEIROS, A. S. *et al.* Nível crítico de fósforo por diferentes extratores químicos em Neossolo Flúvico alcalino cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 7, n. 4, p. 590–596, 5 dez. 2012.

CARMO, Thiago Rezende Lima Do; CABALLERO, Segundo Sacramento Urquiaga; ALVES, Bruno José Rodrigues. Balanço geral de nitrogênio e fósforo na agropecuária brasileira no período de 1990 a 2020. In: ZONTA, Everaldo; PEREIRA, Marcos Gervasio (Eds.). **Agricultura, Mudanças Climáticas e Segurança Alimentar - Anais do VI Simpósio ABC (Argentina-Brasil-Cuba)**. 1. ed. [S.l.]: Atena Editora, 2023. p. 356–361.

CARNEIRO, Leandro Flávio *et al.* Frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um Latossolo com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 483–491, abr. 2011.

CARRINGTON, Damian. Phosphate fertiliser “crisis” threatens world food supply. **The Guardian**, 2019.

CARVALHO, Rui *et al.* Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 3, p. 557–565, 2001.

CEKINSKI, E. Fertilizantes Fosfatados. In: CEKINSKI, E. *et al.* (Eds.). **Tecnologia de Produção de Fertilizantes**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990. p. 95–129.

CHAGAS, Wantuir Filipe Teixeira *et al.* Productive characteristics, nutrition and agronomic efficiency of polymer-coated MAP in lettuce crops. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 2, 2015.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, Baltimore. v. 84, p. 133–144, 1957.

CHEN, C. R. *et al.* Effects of afforestation on phosphorus dynamics and biological properties in a New Zealand grassland soil. **Plant and Soil**, v. 220, n. 1–2, p. 151–163, 2000.

CHIEN, S. H. *et al.* Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 89, n. 2, p. 229–255, 2011.

CHOWDHURY, Rubel Biswas *et al.* Key sustainability challenges for the global phosphorus resource, their implications for global food security, and options for mitigation. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 945–963, jan. 2017.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M. Effects of long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zealand. **Journal of Soil Science**, v. 40, n. 2, p. 383–395, 1989.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by  $^{31}\text{P}$  nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, v. 36, n. 2, p. 199–207, 1985.

CONDRON, L. M.; TIESSEN, H. Interactions of organic phosphorus in terrestrial ecosystems. *In*: TURNER, B. L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. S. (Orgs.). **Organic phosphorus in the environment**. 1. ed. UK: CABI Publishing, 2005. p. 295–307.

CONDRON, Leo M.; NEWMAN, Susan. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, n. 5, p. 830–840, 2011.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 925–930, dez. 2002.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 893–900, out. 2003.

CORRÊA, Rossini Mattos; NASCIMENTO, Clístenes Williams Araújo Do; ROCHA, Alexandre Tavares Da. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 153–159, 2 mar. 2011.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M. Óxidos de ferro. *In*: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e mineralogia do solo**. 1. ed. Viçosa: SBCS, 2009. v. 1 p. 505–572.

COSTA, Karla Samylle De Queiroz *et al.* Fósforo no sistema solo-planta: uma revisão. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 6, p. e5361, 20 jun. 2024.

COSTA, Marlon *et al.* Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus Plantations, Brazil. **Forests**, v. 7, n. 1, p. 15, 2016.

CROSS, Anne Fernald; SCHLESINGER, William H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, v. 64, n. 3–4, p. 197–214, 1995.

DA CRUZ, Diego Fernandes *et al.* Role of Polymeric Coating on the Phosphate Availability as a Fertilizer: Insight from Phosphate Release by Castor Polyurethane Coatings. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 29, p. 5890–5895, 26 jul. 2017.

DA SILVA, Erika Caitano *et al.* Does Structural Equation Modeling Provide a Holistic View of Phosphorus Acquisition Strategies in Soils of Amazon Forest? **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 3, p. 3334–3347, set. 2022.

DE FIGUEIREDO, Cícero Célio *et al.* Polymer-coated phosphate fertilizer and liming on the production and morphological parameters of corn. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 43, n. 3, p. 446–452, 2012.

DO NASCIMENTO, Carlos A. C. *et al.* Phosphorus Mobility and Behavior in Soils Treated with Calcium, Ammonium, and Magnesium Phosphates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, n. 3, p. 622–631, 2018.

DONAGEMMA, Guilherme Kangussu *et al.* Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003–1020, 2016.

DUDA, Gustavo Pereira *et al.* Avaliação da biodisponibilidade de fósforo em diferentes classes de solos do Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 4, p. 1563–1576, 30 ago. 2013.

EISENHAEUER, Nico *et al.* From patterns to causal understanding: Structural equation modeling (SEM) in soil ecology. **Pedobiologia**, v. 58, n. 2–3, p. 65–72, mar. 2015.

ELSER, James; BENNETT, Elena. A broken biogeochemical cycle. **Nature**, v. 478, n. 7367, p. 29–31, 2011.

EVERAERT, Maarten *et al.* Agronomic Effectiveness of Granulated and Powdered P-Exchanged Mg-Al LDH Relative to Struvite and MAP. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 32, p. 6736–6744, 16 ago. 2017.

FAGERIA, Nand Kumar. **The Use of Nutrients in Crop Plants**. 0. ed. [S.l.]: CRC Press, 2009.

FALCÃO, Newton Paulo De Souza; SILVA, José Risonei Assis Da. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 3, p. 337–342, 2004.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt: Pacote experimental designs.**, 2021.

FIXEN, P. E.; GROVE, J. H. Testing Soils for Phosphorus. *In*: WESTERMAN, R. I. (Ed.). **Soil Testing and Plant Analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 1990. v. 3 p. 141–180.

FOX, John; NIE, Zhenghua; BYRNES, Jarrett. **Sem: Structural equation models.** , 2024. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=sem>>

FOX, Thomas R. *et al.* Phosphorus Nutrition of Forest Plantations: The Role of Inorganic and Organic Phosphorus. *In*: BÜNEMANN, Else; OBERSON, Astrid; FROSSARD, Emmanuel (Orgs.). **Phosphorus in Action**. Soil Biology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. v. 26 p. 317–338.

FREITAS, Idelfonso Colares De. **Atributos de um Neossolo Quartzarênico da pré-Amazônia sob agroecossistemas de produção familiar**. Goiânia-GO: UFG, 2013.

GAMA-RODRIGUES, A. C. *et al.* An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. **Biogeochemistry**, v. 118, n. 1–3, p. 453–469, 17 abr. 2014.

GAO, Shengchao *et al.* Effects of humic acid–enhanced phosphate fertilizer on wheat yield, phosphorus uptake, and soil available phosphorus content. **Crop Science**, v. 63, n. 2, p. 956–966, 1 mar. 2023.

GATIBONI, Luciano Colpo *et al.* Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 691–699, ago. 2007.

GATIBONI, Luciano Colpo *et al.* Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos líquidos de suínos em pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1753–1761, 2008.

GATIBONI, Luciano Colpo; BRUNETTO, Gustavo; KAMINSKI, João. **Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações**. 2013.

GATIBONI, Luciano Colpo; KAMINSKI, João; SANTOS, Danilo Rheinheimer dos. Modificações nas formas de fósforo do solo após extrações sucessivas com Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 363–371, 2005.

GRACE, James B. **Structural Equation Modeling and Natural Systems**. 1. ed. Cambridge: University Press, 2006.

GRACE, James B.; BOLLEN, Kenneth A. Representing general theoretical concepts in structural equation models: the role of composite variables. **Environmental and Ecological Statistics**, v. 15, n. 2, p. 191–213, jun. 2008.

GUEDES, Rafael Silva *et al.* Adsorption and desorption kinetics and phosphorus hysteresis in highly weathered soil by stirred flow chamber experiments. **Soil and Tillage Research**, v. 162, p. 46–54, set. 2016.

GUELFI, Douglas *et al.* Innovative Phosphate Fertilizer Technologies to Improve Phosphorus Use Efficiency in Agriculture. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 21, 1 nov. 2022.

GUELF, Douglas Ramos *et al.* Monoammonium phosphate coated with polymers and magnesium for coffee plants. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 3, p. 261–270, 1 maio 2018.

GUO, Fengmao; YOST, Russell S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Science**, v. 163, n. 10, p. 822–833, 1998.

HAIR, Joseph F. *et al.* Multivariate data analysis (8. Baskı). **Eight Edition, Cengage: Learning EMEA**, 2019.

HAIR JR., Joseph F. *et al.* **Análise Multivariada De Dados**. 6. ed. [S.l.]: Bookman, 2009.

HANSEL, Fernando Dubou. **Fertilizantes fosfatados aplicados a lanço e em linha na cultura da soja sob semeadura direta**. Unpublished, , 2013. Disponível em: <<http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.3641.7529>>. Acesso em: 12 ago. 2025

HANYABUI, Emmanuel *et al.* Phosphorus sorption in tropical soils. **AIMS Agriculture and Food**, v. 5, n. 4, p. 599–616, 2020.

HAVLIN, John L. **Soil Fertility and Fertilizers**. 8. ed. [S.l.]: Pearson India, 2017.

HAWKINS, J. M. B. *et al.* The effect of soil organic matter on long-term availability of phosphorus in soil: Evaluation in a biological P mining experiment. **Geoderma**, v. 423, p. 115965, 1 out. 2022.

HAYNES, R. J.; MOKOLOBATE, M. S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 59, n. 1, p. 47–63, jan. 2001.

HE, Xianjin *et al.* Global patterns and drivers of phosphorus fractions in natural soils. **Biogeosciences**, v. 20, p. 4147–4163, 2023.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in Inorganic and Organic Soil Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 5, p. 970–976, set. 1982.

HELFENSTEIN, Julian *et al.* Soil solution phosphorus turnover: derivation, interpretation, and insights from a global compilation of isotope exchange kinetic studies. **Biogeosciences**, v. 15, n. 1, p. 105–114, 8 jan. 2018.

HINGSTON, F. J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite - I: the role of the proton in determining adsorption envelopes. **Journal of Soil Science**, v. 23, p. 177–191, 1972.

HOU, Enqing *et al.* A structural equation model analysis of phosphorus transformations in global unfertilized and uncultivated soils. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 30, n. 9, p. 1300–1309, set. 2016.

HOU, Enqing *et al.* Solubility of phosphorus in subtropical forest soils as influenced by low-molecular organic acids and key soil properties. **Geoderma**, v. 313, p. 172–180, 1 mar. 2018.

HOYLE, Rick H.; SMITH, Gregory T. Formulating clinical research hypotheses as structural equation models: A conceptual overview. **Journal of Consulting and Clinical Psychology**, v. 62, n. 3, p. 429–440, 1994.

HU, Li-tze; BENTLER, Peter M. Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. **Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal**, v. 6, n. 1, p. 1–55, 1999.

ICHINOSE, Yuri *et al.* How do reactive aluminum and iron phases control soil organic carbon and phosphate adsorption capacity in agricultural topsoils across Japan? **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 71, n. 1, p. 38–52, 2 jan. 2025.

IKHAJIAGBE, Beckley *et al.* RETRACTED: Major phosphorus in soils is unavailable, yet critical for plant development. **Notulae Scientia Biologicae**, v. 12, n. 3, p. 500–535, 29 set. 2020.

IRIONDO, José M.; ALBERT, María J.; ESCUDERO, Adrián. Structural equation modelling: an alternative for assessing causal relationships in threatened plant populations. **Biological Conservation**, v. 113, n. 3, p. 367–377, out. 2003.

JASINSKI, Stephen. **Phosphate Rock, Mineral Commodity Summaries 2025.** , 2025.

JASINSKI, Stephen M. **Phosphate Rock, Mineral Commodity Summaries 2021.** , 2021.

JOLLIFFE, I. T. **Principal Component Analysis.** New York: Springer-Verlag, 2002.

JÖRESKOG, Karl G.; SÖRBOM, Dag. Recent Developments in Structural Equation Modeling. **Journal of Marketing Research**, v. 19, n. 4, p. 404–416, nov. 1982.

KAFLE, Arjun *et al.* Harnessing Soil Microbes to Improve Plant Phosphate Efficiency in Cropping Systems. **Agronomy**, v. 9, n. 3, p. 127, 8 mar. 2019.

KAISER, Henry F. The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 141–151, abr. 1960.

KAPLAN, D. **Structural equation modeling: foundations and extensions.** Thousand Oaks, California: Sage Publications, 2000. v. 10

KASSEM, Ihsane *et al.* Biodegradable all-cellulose composite hydrogel as eco-friendly and efficient coating material for slow-release MAP fertilizer. **Progress in Organic Coatings**, v. 162, p. 106575, 1 jan. 2022.

KLINE, Rex B. **Principles and practice of structural equation modeling, 4th ed.** New York, NY, US: The Guilford Press, 2016. p. xvii, 534

KLOTZBÜCHER, Anika *et al.* Testing mechanisms underlying the Hedley sequential phosphorus extraction of soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 182, n. 4, p. 570–577, ago. 2019.

KORKMAZ, Selcuk; GOKSULUK, Dincer; ZARARSIZ, Gokmen. MVN: An R Package for Assessing Multivariate Normality. **The R Journal**, v. 6, n. 2, p. 151, 2014.

KOUR, Divjot *et al.* Biodiversity, current developments and potential biotechnological applications of phosphorus-solubilizing and -mobilizing microbes: A review. **Pedosphere**, v. 31, n. 1, p. 43–75, fev. 2021.

LÊ, Sébastien; JOSSE, Julie; HUSSON, François. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, p. 1–18, 2008.

LEHNINGER, Albert L. **Short course in biochemistry**. New York: Worth Publishers, 1973.

LEITE, Jacqueline Nayara Ferraça *et al.* Frações orgânicas e inorgânicas do fósforo no solo influenciadas por plantas de cobertura e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 11, p. 1880–1889, nov. 2016.

LIMA, Regina Lúcia Félix De Aguiar. Micorrizas arbusculares e absorção de fósforo em função da capacidade de fixação de fósforo do solo e da competição com a microbiota. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1062–1079, 1 jun. 2020.

LINDSAY, W. L.; LEHR, J. R.; STEPHENSON, H. F. Nature of the Reactions of Monocalcium Phosphate Monohydrate in Soils: III. Studies with Metastable Triple-Point Solution. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 5, p. 342–345, 1959.

LINDSAY, W. L.; STEPHENSON, H. F. Nature of the Reactions of Monocalcium Phosphate Monohydrate in Soils: II. Dissolution and Precipitation Reactions Involving Iron, Aluminum, Manganese, and Calcium. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 1, p. 18–22, 1959.

LINDSAY, Willard L. **Chemical Equilibria in Soils**. New York: John Wiley & Sons, 1979.

LISHINSKI, Alex. lavaanPlot: Path diagrams for Lavaan models via DiagrammeR. **R package version 0.6**, v. 2, p. 2021, 2021.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; CUNHA, J. F. da. **Superfosfato Simples**. São Paulo: Gráfica Nagy, 2010.

LU, Chun *et al.* Phosphorus Dynamics in Managed and Natural Soils: SEM-PLS Analysis of Vaccinium, Forest, and Grassland Ecosystems. **Plants**, v. 14, n. 2, p. 189, jan. 2025.

LUO, Yuan-Jun; YUAN, Da-Gang; HUANG, Lai-Ming. Soil phosphorus fraction and availability dynamics along a 2-million-year soil chronosequence in northern Hainan Island, China. **Geoderma**, v. 448, p. 116957, ago. 2024.

MACDONALD, Graham K. *et al.* Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 7, p. 3086–3091, 2011.

MALAVOLTA, E. *et al.* Estudos sobre a nutrição mineral do arroz: XV. absorção radicular e foliar do radiofósforo pelas variedades IAC-47 e IAC-435. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 38, n. 2, p. 695–721, 1981.

MARSCHNER, Horst. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed ed. London Waltham, MA: Academic Press, 2012.

MARTINAZZO, Rosane *et al.* Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 563–570, jun. 2007.

MCLAREN, Timothy I. *et al.* The chemical nature of organic phosphorus that accumulates in fertilized soils of a temperate pasture as determined by solution<sup>31</sup>P NMR spectroscopy. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 180, n. 1, p. 27–38, fev. 2017.

MIGNACCA, Flávia Alessandra. **Fracionamento de fósforo de um Argissolo Vermelho distroférico submetido a manejos de correção e adubação em sistema de integração lavoura-pecuária**. 2016. Universidade do Oeste Paulista, UNOESTE, Brasil, 2016. Disponível em: <<http://bdt.d.unoeste.br:8080/jspui/handle/jspui/1046>>

MIHAILESCU, E. *et al.* Phosphorus balance and use efficiency on 21 intensive grass-based dairy farms in the South of Ireland. **The Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 3, p. 520–537, 2015.

MIRABELLO, M. J. *et al.* Soil phosphorus responses to chronic nutrient fertilisation and seasonal drought in a humid lowland forest, Panama. **Soil Research**, v. 51, n. 3, p. 215, 2013.

MIRANDA, Li Chaves. **Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados de diferentes tempos de liberação aplicados em solos de textura contrastante**. Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal—[S.l.]: UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI, 2023.

MITCHELL, R. J. Testing Evolutionary and Ecological Hypotheses Using Path Analysis and Structural Equation Modelling. **Functional Ecology**, v. 6, n. 2, p. 123, 1992.

MME. **Relatório Técnico 54 - Perfil do Enxofre**. Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2009.

MOREIRA, A. *et al.* Avaliação da disponibilidade do fósforo no solo por métodos isotópico, químicos e biológico. **Scientia Agricola**, v. 54, p. 1–2, 1997.

MOREIRA, Fatima Maria De Souza; SIQUEIRA, Jose Oswaldo. **Microbiologia E Bioquímica Do Solo**. 2. ed. [S.l.]: Editora da UFLA, 2006.

MOUSAVI, Seyed Roohollah *et al.* Cause-effect relationships using structural equation modeling for soil properties in arid and semi-arid regions. **CATENA**, v. 232, p. 107392, 1 nov. 2023.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, p. 31–36, 1962.

NEVES, Jorge Alexandre Barbosa. **Modelo de equações estruturais: uma introdução aplicada**. 2018.

NOVAIS, R. F.; KAMPRATH, E. J. Parametros das isotermas de adsorcao de fosforo como criterio de recomendacao de adubacao fosfatada. Parte de tese. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 3, 1979.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999.

NOVAIS, Roberto Ferreira; SMYTH, T. Jot; NUNES, Flancer Novais. Fósforo. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa-MG: [S.n.]. p. 471–550.

NUNES, Ana Paula Pereira; SANTOS, César Ferreira; GUELF, Douglas. Interfaces between biodegradable organic matrices coating and MAP fertilizer for improve use efficiency. **Science of The Total Environment**, v. 804, p. 149896, 15 jan. 2022.

NUNES, Rafael de Souza *et al.* Distribution of Soil Phosphorus Fractions as a Function of Long-Term Soil Tillage and Phosphate Fertilization Management. **Frontiers in Earth Science**, v. 8, p. 350, 2 set. 2020.

OLIVEIRA, Lara Caroline Alves De *et al.* Frações de fósforo em função do uso de fertilizantes fosfatados em distintas classes de solo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 4, p. 1–15, 2021.

OLIVEIRA, Maiara Prates; MALAGOLLI, Guilherme Augusto; CELLA, Daltro. MERCADO DE FERTILIZANTES: dependência de importações do Brasil. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 1, p. 489–498, 2019.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A. *et al.* **Recomendação agrônômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho**. - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1120362/recomendacao-agronomica-de-cepas-de-bacillus-subtilis-cnpms-b2084-e-bacillus-megaterium-cnpms-b119-na-cultura-do-milho>>. Acesso em: 11 ago. 2025.

PARFITT, R. L. Anion Adsorption by Soils and Soil Materials. *In*: **Advances in Agronomy**. [S.l.]: Elsevier, 1978. v. 30 p. 1–50.

PAULY, D. G.; MALHI, S. S.; NYBORG, M. Controlled-release P fertilizer concept evaluation using growth and P uptake of barley from three soils in greenhouse. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 82, n. 2, p. 201–210, 1 maio 2002.

PAVINATO, Paulo S. *et al.* Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports 2020 10:1**, v. 10, n. 1, p. 1–11, 28 set. 2020.

PAVINATO, Paulo Sérgio. **Dinâmica do fósforo no solo em função do manejo e da presença de resíduos em superfície**. Tese (Doutorado em Agronomia-Agricultura)—Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 2007.

PENN, Chad; CAMBERATO, James. A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. **Agriculture**, v. 9, n. 6, p. 120, 8 jun. 2019.

PEREIRA, Suziane dos Santos. **Modelagem de Equações Estruturais no Software R**, 2013.

PESSOA-DE-SOUZA, Marco Aurélio *et al.* Comportamento químico de Nossolos Quartzarênicos em Mineiros, sudoeste goiano. **Geosciences = Geociências**, v. 34, n. 3, p. 335–347, 24 jul. 2015.

PIERZYNSKI, Gary M.; MCDOWELL, Richard W.; THOMAS SIMS, J. Chemistry, Cycling, and Potential Movement of Inorganic Phosphorus in Soils. *In*: THOMAS SIMS, J.; SHARPLEY, Andrew N. (Orgs.). **Agronomy Monographs**. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 2005. p. 51–86.

PILATI, Ronaldo; LAROS, Jacob Arie. Modelos de equações estruturais em psicologia: conceitos e aplicações. **Psicologia: Teoria e Pesquisa**, v. 23, n. 2, p. 205–216, jun. 2007.

PIZZEGHELLO, Diego *et al.* Bioactivity of Size-Fractionated and Unfractionated Humic Substances From Two Forest Soils and Comparative Effects on N and S Metabolism, Nutrition, and Root Anatomy of *Allium sativum* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1203, 14 ago. 2020.

PROCHNOW, Luíz Ignácio; ALCARDE, José Carlos; CHIEN, Sen Hsuing. Eficiência agrônômica dos fosfatos totalmente acidulados. *In*: YAMADA, Tsuioshi; ABDALLA, Silvia Regina Stipp (Eds.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba-SP: POTAFOS, 2004. p. 605–654.

R CORE TEAM. **R: O Projeto R para Computação Estatística**. ViennaR Foundation for Statistical Computing, , 2021. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 14 ago. 2025

RAFIQUE, Mazhar *et al.* Residual effects of biochar and phosphorus on growth and nutrient accumulation by maize (*Zea mays* L.) amended with microbes in texturally different soils. **Chemosphere**, v. 238, 1 jan. 2020.

RAHMAN, Mohammad A. *et al.* Soil Phosphorus Partition and Transformations Under Diverse Land Uses. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 55, n. 15, p. 2232–2247, 21 ago. 2024.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. [S.l.]: Editora Agronômica Ceres, 1991.

RAIJ, B. van. *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996.

RAIJ, B. van. Fósforo no solo e interação com outros elementos. *In*: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Eds.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato, 2004.

REDEL, Y. *et al.* Assessment of phosphorus status influenced by Al and Fe compounds in volcanic grassland soils. **Journal of soil science and plant nutrition**, n. ahead, p. 0–0, 2016.

REETZ JR, Harold F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. Paris: International Fertilizer industry Association - IFA, 2016.

REVELLE, William. **psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research**. Northwestern University, Evanston, Illinois., 2025. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=psych>>. Acesso em: 26 set. 2025

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Bras. Ci. Solo**, v. 24, p. 589–597, 2000.

RICHARDSON, A. E. Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. **Functional Plant Biology**, v. 28, n. 9, p. 897–906, 2001.

RIVAIE, A. A. *et al.* Effect of phosphate rock and triple superphosphate on soil phosphorus fractions and their plant-availability and downward movement in two volcanic ash soils under *Pinus radiata* plantations in New Zealand. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 82, n. 1, p. 75–88, set. 2008.

RODRIGUES, Marcos *et al.* Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104770, 2020.

ROLIM NETO, F. C. *et al.* Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 953–964, dez. 2004.

ROSSEEL, Yves. lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling. **Journal of Statistical Software**, v. 48, p. 1–36, 24 maio 2012.

ROY, Eric D. *et al.* The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, v. 2, n. 5, p. 16043, 18 abr. 2016.

SAENTHO, Apinya *et al.* Speciation and pH- and particle size-dependent solubility of phosphorus in tropical sandy soils. **Geoderma**, v. 408, p. 115590, fev. 2022.

SALES, Marcus Vinicius da silva. **Modelagem de equações estruturais aplicada ao estudo do ciclo do P em solos tropicais**. Campus Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2015.

SALES, M. V. S. *et al.* Respecification of structural equation models for the P cycle in tropical soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 102, n. 3, p. 347–358, 23 jul. 2015.

SALES, Marcus V. S. *et al.* Structural equation modeling for the estimation of interconnections between the P cycle and soil properties. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 109, n. 2, p. 193–207, 1 nov. 2017.

SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. Reactions of Phosphate Fertilizers in Soils. *In: ASA, CSSA, and SSSA Books*. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1980. p. 263–310.

SANTORO, Veronica; SCHIAVON, Michela; CELI, Luisella. Role of soil abiotic processes on phosphorus availability and plant responses with a focus on strigolactones in tomato plants. **Plant and Soil**, v. 494, n. 1, p. 1–49, 1 jan. 2024.

SANTOS, Danilo Rheinheimer dos; GATIBONI, Luciano Colpo; KAMINSKI, João. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 576–586, abr. 2008.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília-DF: EMBRAPA, 2025.

SANTOS, José Zilton Lopes *et al.* Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 705–714, abr. 2008.

SARKAR, Abhijit *et al.* Polymer coated novel controlled release rock phosphate formulations for improving phosphorus use efficiency by wheat in an Inceptisol. **Soil and Tillage Research**, v. 180, p. 48–62, ago. 2018.

SATO, Shinjiro *et al.* Biogenic calcium phosphate transformation in soils over millennial time scales. **Journal of Soils and Sediments**, v. 9, n. 3, p. 194–205, jun. 2009.

SCHOLZ, Roland W. *et al.* The dynamics of increasing mineral resources and improving resource efficiency: Prospects for mid- and long-term security of phosphorus supply. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 213, p. 107993, 1 fev. 2025.

SCHREIBER, James B. *et al.* Reporting Structural Equation Modeling and Confirmatory Factor Analysis Results: A Review. **The Journal of Educational Research**, v. 99, n. 6, p. 323–338, 1 jul. 2006.

SHEN, Jianbo *et al.* Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997–1005, jul. 2011.

SHEN, Jianbo *et al.* Innovations of phosphorus sustainability: implications for the whole chain. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 6, n. 4, p. 321, 2019.

SHIGAKI, Francirose. **Transporte de fósforo na enxurrada superficial em função do tipo de fonte de P e intensidade das chuvas: Relevância à gerência ambiental em sistemas de produção brasileiros**. Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 1 set. 2006.

SHREVE, Randolph Norris; BRINK, Joseph A. **Indústrias de processos químicos**. 4. ed ed. Rio de Janeiro (RJ): Guanabara, 1997.

SILVA, Erika Caitano da. **Modelagem de equações estruturais no ciclo do fósforo no solo e estratégias de aquisição em solos de diferentes pedogêneses**. Campus Goytacazes-RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2021.

SILVA, Edson Cabral Da *et al.* Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 353–362, 2005.

SILVA, F. C. **Manual De Análises Químicas De Solos, Plantas E Fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

SOUSA, Djalma Martinhão Gomes de; LOBATO, Edson. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília-DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004.

SOUZA, A. E.; FONSECA, D. S. **Fosfato**. Brasília: DNPM, , 2017.

SOUZA FILHO, Luiz Francisco da Silva. **Formas de fósforo em Latossolo sob Cerrado em função do tempo de uso agrícola**. tese de doutorado—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.

SOUZA JÚNIOR, Reginaldo Fidelis De *et al.* Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 159–170, fev. 2012.

SPARKS, Donald L. Environmental Soil Chemistry: An Overview. *In*: SPARKS, Donald L. (Org.). **Environmental Soil Chemistry (Second Edition)**. Burlington: Academic Press, 2003. p. 1–42.

SPOHN, Marie; KUZYAKOV, Yakov. Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 61, p. 69–75, jun. 2013.

STAUFFER E *et al.* **Enhanced efficiency phosphate fertilizers and phosphorus availability in Acrudox**. Disponível em: <<https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.338268665037949>>. Acesso em: 5 jun. 2023.

SUGIHARA, Soh *et al.* Soil phosphorus of stable fraction differentially associate with carbon in the tropical forest and savanna of eastern Cameroon. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 63, n. 6, p. 616–627, 2 nov. 2017.

SYERS, John K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, Denis. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008.

TAKAHASHI, Shigeru; ANWAR, Muhuddin R. Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. **Field Crops Research**, v. 101, n. 2, p. 160–171, mar. 2007.

TANG, Zhi *et al.* Mechanisms and Implications of Phosphate Retention in Soils: Insights from Batch Adsorption Experiments and Geochemical Modeling. **Water**, v. 17, n. 7, p. 998, 28 mar. 2025.

TEIXEIRA, Rafael da Silva *et al.* Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 16, n. 4, p. 1097–1112, 2016.

TIAN, Huixia *et al.* Structural Equation Modeling of Phosphorus Transformations in Soils of *Larix principis-rupprechtii* Mayr. Plantations. **Forests**, v. 14, n. 9, p. 1811, set. 2023.

TIECHER, Tales *et al.* Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 271–282, fev. 2012.

TIECHER, Tales *et al.* Cover Crops Affecting Soil Phosphorus Dynamic in Brazilian Highly Weathered Soils. *In*: REUTER, Jonah (Ed.). **Cover Crops: Cultivation, Management and Benefits**. Hauppauge, New York: Nova Science Publishers Inc, 2016.

TIESSEN, H.; MOIR, J. O. Characterization of Available P by Sequential Extraction. *In*: CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G. (Eds.). **Soil Sampling and Methods of Analysis**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. p. 293–306.

TIESSEN, Holm. Phosphorus Dynamics in Tropical Soils. *In*: THOMAS SIMS, J.; SHARPLEY, Andrew N. (Orgs.). **Agronomy Monographs**. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 2005. p. 253–262.

TOKURA, Alessandra Mayumi *et al.* Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 1, p. 9–16, 2007.

TOKURA, Alessandra Mayumi *et al.* Dinâmica das formas de fósforo em solos de textura e mineralogia contrastantes cultivados com arroz. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 171–179, 2011.

TURNER, Benjamin L.; HAYGARTH, Philip M. Phosphorus solubilization in rewetted soils. **Nature**, v. 411, n. 6835, p. 258, 2001.

VAN KAUWENBERGH, S. J. **World Phosphate Rock Reserves and Resources**. Muscle Shoals: IFDC, 2010.

VIANA, Selma Ferreira *et al.* Variabilidade espacial dos atributos químicos em terra preta de índio cultivada na região de Novo Aripuanã, AM. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 3, p. 53–58, 14 ago. 2016.

VIANA, Tarciana de Oliveira. **Frações de fósforo sob diferentes usos e classes de solo na região sul da Bahia**. Tese de doutorado—CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2016.

VIEIRA, Nilson Darlan. **Resposta da soja a fontes e doses de fósforo em solos com diferentes teores de argila**.

VOGEL, Christian *et al.* Uranium and thorium species in phosphate rock and sewage sludge ash based phosphorus fertilizers. **Journal of Hazardous Materials**, v. 382, p. 121100, jan. 2020.

VOLF, Marcelo R.; ROSOLEM, Ciro A. Soil P Diffusion and Availability Modified by Controlled-Release P Fertilizers. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 1, p. 162–172, 1 mar. 2021.

WALKER, T. W.; SYERS, J. K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, v. 15, n. 1, p. 1–19, 1976.

WANG, Yuan *et al.* Soil phosphorus availability and fractionation in response to different phosphorus sources in alkaline and acid soils: a short-term incubation study. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 5677, 7 abr. 2023.

WEIL, Ray R.; BRADY, Nyle C. **The nature and properties of soils**. Fifteenth edition, global edition ed. Harlow, England London New York: Pearson, 2017.

WITHERS, Paul J. A. *et al.* Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 2537, 7 fev. 2018.

WRIGHT, Sewall. The Method of Path Coefficients. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 5, n. 3, p. 161–215, 1934.

WU, Ping *et al.* A scientometric review of biochar research in the past 20 years (1998–2018). **Biochar** 2019 1:1, v. 1, n. 1, p. 23–43, 27 mar. 2019.

YI, Chenxu *et al.* Speciation of Iron and Aluminum in Relation to Phosphorus Sorption and Supply Characteristics of Soil Aggregates in Subtropical Forests. **Forests**, v. 14, n. 9, p. 1804, 4 set. 2023.

ZAMUNER, E. C.; PICONE, L. I.; ECHEVERRIA, H. E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. **Soil and Tillage Research**, v. 99, n. 2, p. 131–138, 2008.

ZAPATA, F.; ROY, R. N. **Use of phosphate rocks for sustainable agriculture**. Rome: FAO, 2004.

ZHANG, Hongzhi; SHI, Leilei; FU, Shenglei. Effects of nitrogen deposition and increased precipitation on soil phosphorus dynamics in a temperate forest. **Geoderma**, v. 380, p. 114650, 2020.

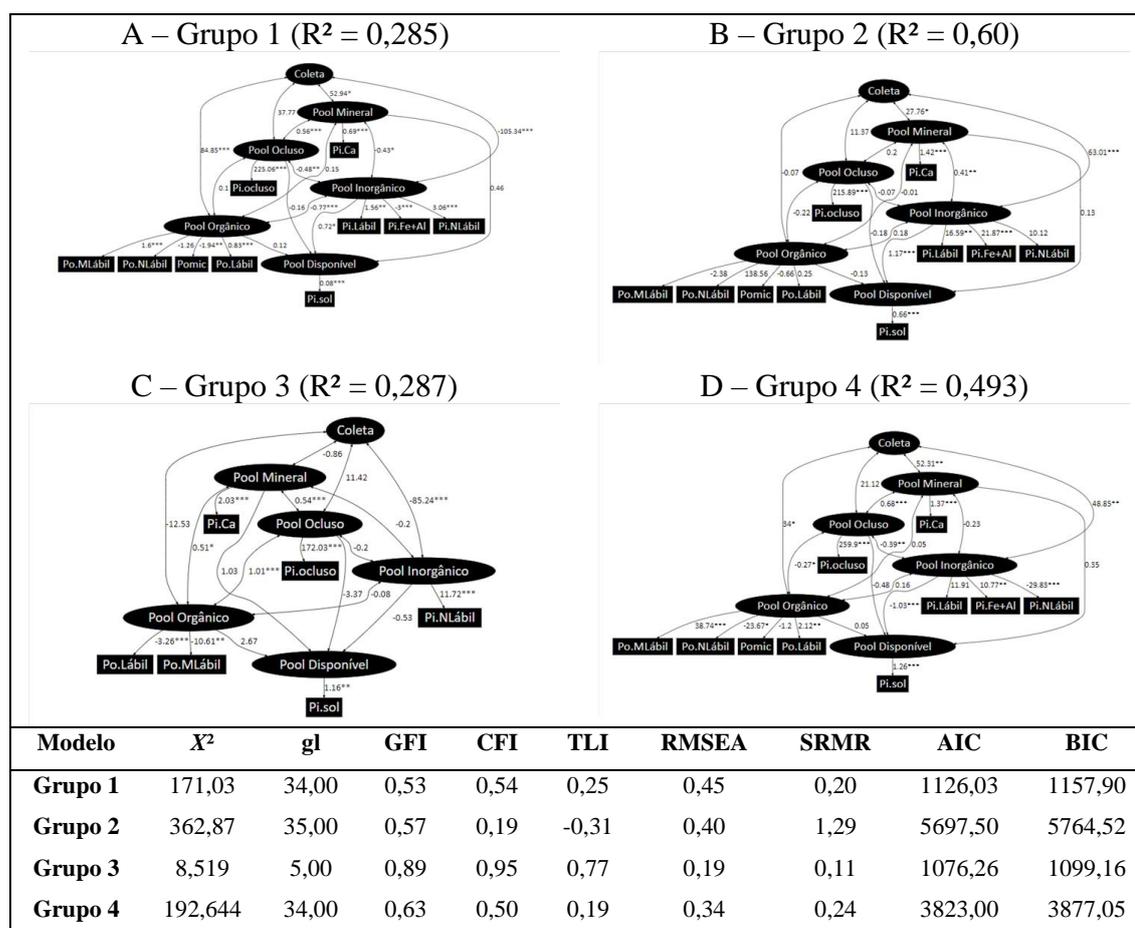
ZHANG, Shugang *et al.* Biowaste-derived, nanohybrid-reinforced double-function slow-release fertilizer with metal-adsorptive function. **Chemical Engineering Journal**, v. 450, p. 138084, 2022.

ZHAO, Wenfei *et al.* Novel Weighting Method for Evaluating Forest Soil Fertility Index: A Structural Equation Model. **Plants**, v. 12, n. 2, p. 410, 15 jan. 2023.

ZHU, Jing; LI, Min; WHELAN, Mick. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. **Science of The Total Environment**, v. 612, p. 522–537, 15 jan. 2018.

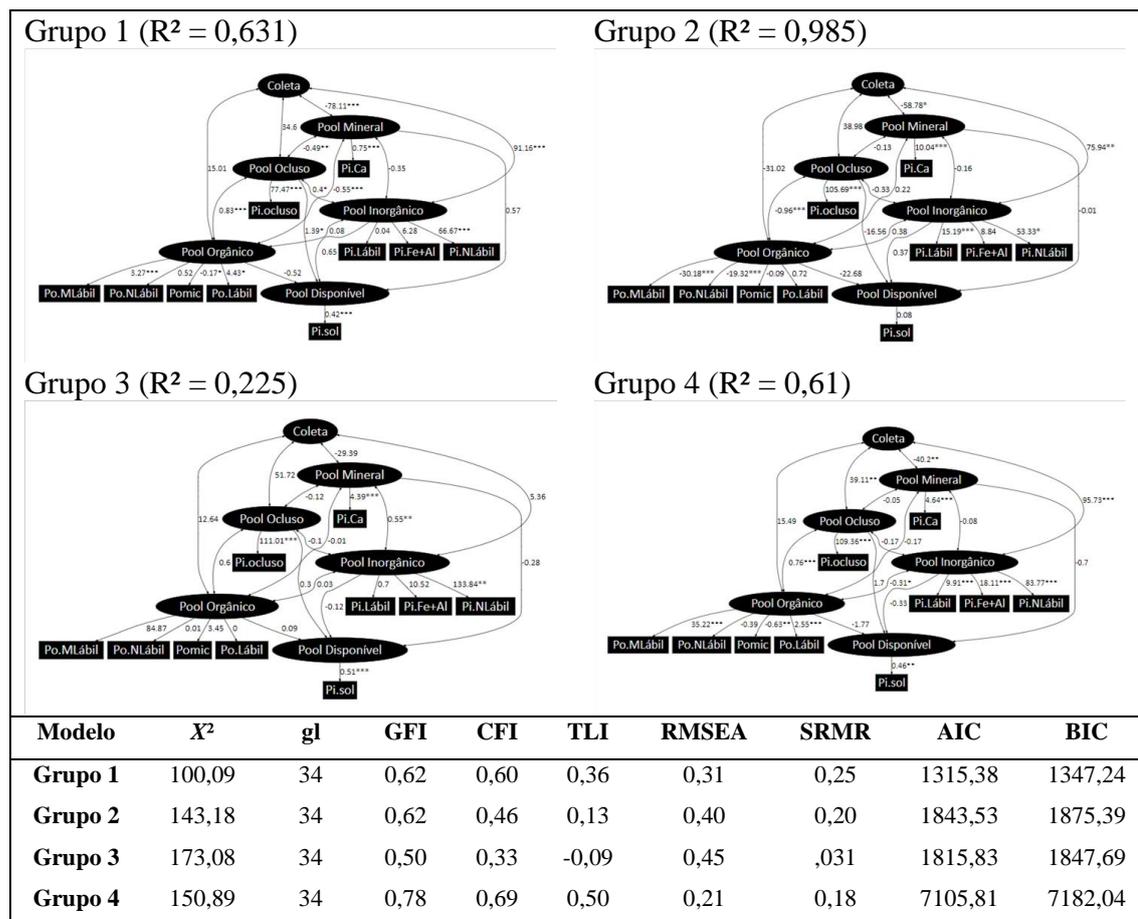
## ANEXOS

**ANEXO 1.** Modelos completos de equações estruturais (SEM) ajustados às frações de fósforo em Neossolo Quartzarênico órtico típico (RQo) ao longo de 360 dias de incubação, organizados em quatro agrupamentos de tratamentos (painéis A–D): (A) Controle; (B) monoamônio fosfato (MAP), superfosfato triplo recoberto com KimcoatBioHP® (ST|Kim) e com IFCoat (ST|IF); (C) monoamônio fosfato recoberto com IFCoat (MAP|IF); (D) superfosfato triplo (ST), monoamônio fosfato recoberto com KimcoatBioHP® (MAP|Kim). Para cada agrupamento, apresentam-se os diagramas estruturais completos e os respectivos índices globais de ajuste ( $\chi^2/df$ , CFI, TLI, RMSEA, SRMR, AIC e BIC).

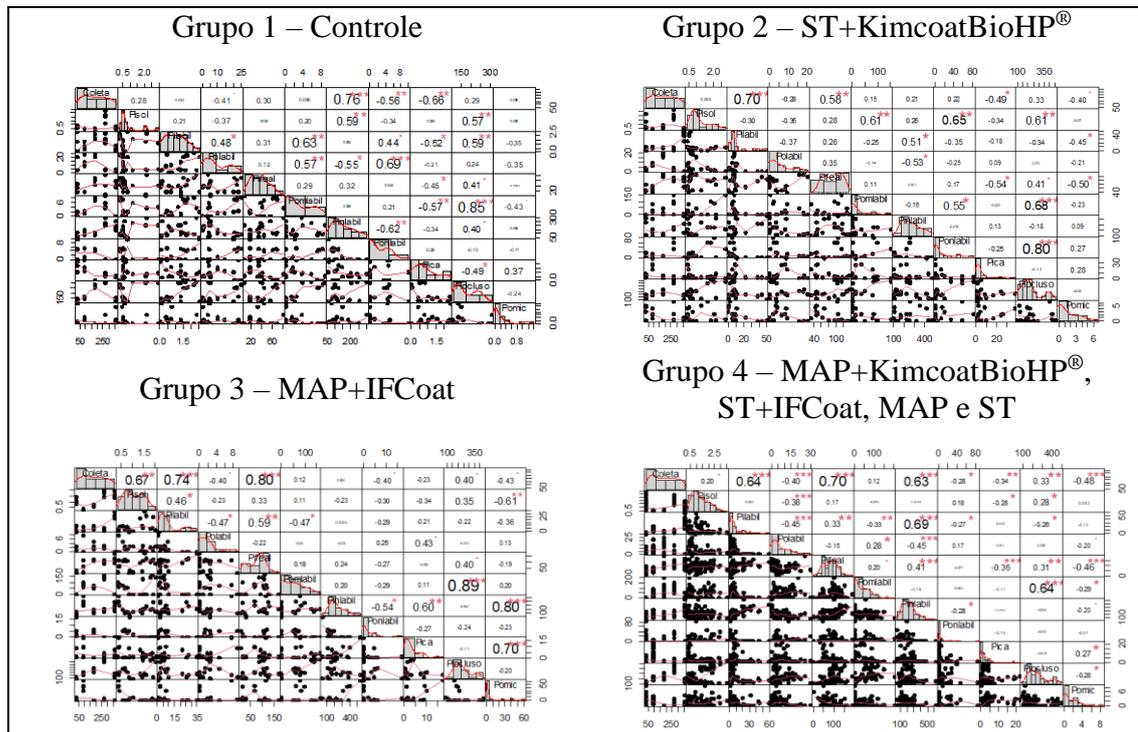




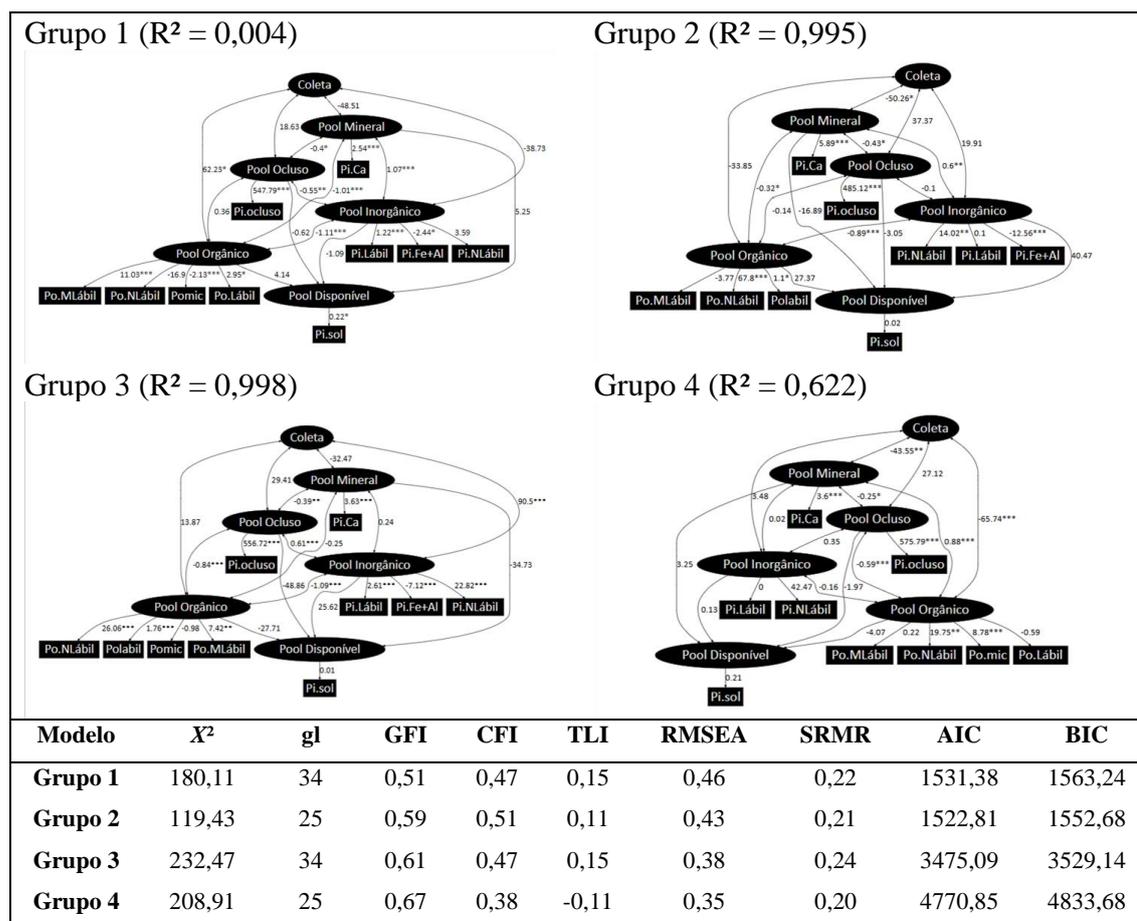
**ANEXO 3.** Modelos completos de equações estruturais (SEM) ajustados às frações de fósforo em um Latossolo Vermelho Amarelo acriférico (LVAwf) ao longo de 360 dias de incubação, organizados em quatro agrupamentos de tratamentos (painéis A–D): (A) Controle; (B) superfosfato triplo recoberto com KimcoatBioHP® (ST|Kim); (C) monoamônio fosfato recoberto com IFCoat (MAP|IF); (D) monoamônio fosfato (MAP), superfosfato triplo (ST), monoamônio fosfato recoberto com KimcoatBioHP® (MAP|Kim) e superfosfato triplo recoberto com IFCoat (ST|IF). Para cada agrupamento, apresentam-se os diagramas estruturais completos e os respectivos índices globais de ajuste ( $\chi^2/df$ , CFI, TLI, RMSEA, SRMR, AIC e BIC).



**ANEXO 4.** Correlações entre as frações de P e as coletas para os grupos de dados obtidos no Latossolo Vermelho Amarelo acriférrico (LVAwf).



**ANEXO 5.** Modelos completos de equações estruturais (SEM) ajustados às frações de fósforo em um Nitossolo Vermelho eutrófico típico (NVe) ao longo de 360 dias de incubação, organizados em quatro agrupamentos de tratamentos (painéis A–D): (A) Controle; (B) superfosfato triplo (ST); (C) superfosfato triplo recoberto com KimcoatBioHP® (ST|Kim) e com IFCoat (ST|IF); (D) monoamônio fosfato (MAP), monoamônio fosfato recoberto com KimcoatBioHP® (MAP|Kim) e com IFCoat (MAP|IF). Para cada agrupamento, apresentam-se os diagramas estruturais completos e os respectivos índices globais de ajuste ( $\chi^2/df$ , CFI, TLI, RMSEA, SRMR, AIC e BIC).





## 7. CAPÍTULO V

### **Phosphorus use efficiency in soybean and maize in function of humic and polymer-coated MAP fertilizers**

(Normas de acordo com a revista *Agronomy Journal*).

#### **ABSTRACT**

Phosphorus (P) fertilization is one of the highest costs in soybean and maize production, yet P use efficiency remains low in tropical soils due to strong adsorption and precipitation reactions. This study evaluated the effectiveness of humic- and polymer-based additives associated with monoammonium phosphate (MAP) in improving P efficiency under field conditions. Two experiments were carried out: the first with soybean, testing broadcast and row MAP applications combined with six doses of PhytohumusBio<sup>®</sup> (0–7.5 kg Mg<sup>-1</sup>), and the second with maize, arranged in a 2 × 4 + 1 factorial with MAP or MAP+KimcoatBioHP<sup>®</sup> across four P rates plus an unfertilized control. In soybean, PhytohumusBio<sup>®</sup> increased grain yield by up to 549 kg ha<sup>-1</sup> and improved both agronomic efficiency (AE) and P use efficiency (PUE), despite minor reductions in cationic micronutrient uptake. In maize, KimcoatBioHP<sup>®</sup> reduced early shoot and root growth and decreased grain yield by 28%, largely due to severe drought and frost stress, resulting in greater P retention in crop residues rather than yield gains. Overall, humic-based additives enhanced P efficiency in soybean, whereas polymer-coated MAP did not benefit maize under unfavorable conditions. These findings highlight the crop- and environment-specific effectiveness of fertilizer additives and

emphasize the need to align technologies with soil P legacy and climate resilience in tropical agriculture.

### **PLAIN LANGUAGE SUMMARY**

In tropical soils, much of the phosphorus fertilizer quickly becomes unavailable to crops. We tested humic and polymer additives combined with MAP fertilizer in soybean and maize. Applying MAP in the planting row and using additives increased soil-test P and grain yield, especially at moderate P rates. These findings show farmers can improve phosphorus efficiency and reduce costs in soybean–maize rotations.

### **CORE IDEAS**

Humic substances enhanced soybean performance in tropical soil.

Polymer coating reduced early maize growth without yield gain.

Drought and frost limited maize response to phosphorus fertilization.

Phosphorus legacy and management define fertilizer efficiency.

### **ABBREVIATIONS**

AE, agronomic efficiency; ANOVA, analysis of variance; GY, grain yield; MAP, monoammonium phosphate; P, phosphorus; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, diphosphorus pentoxide; PBalance, phosphorus balance; PDose, phosphorus dose; PExp, phosphorus export; PStover, phosphorus in stover; PUE, phosphorus use efficiency; R, R statistical software; SPAD, Soil Plant Analysis Development index.

## 7.1 INTRODUCTION

The intensive use of phosphate fertilizers over past decades has led to the accumulation of a “legacy P” in soils, characterized by large reserves of the nutrient in forms poorly available to plants (Rodrigues et al., 2016; Withers et al., 2018). In tropical soils, the low efficiency of applied P results from the rapid fixation of phosphate by iron and aluminum oxides and soil colloid surfaces, which progressively reduces its lability (Fink et al., 2016; Hou et al., 2018; Novais & Smyth, 1999).

To overcome these limitations, different technologies have been proposed to improve P use efficiency. Humic acids, derived from organic residues decomposition, can compete with phosphate for adsorption sites, forming a physical barrier on mineral surfaces. They may also stimulate root growth and microbial activity, thereby favoring nutrient acquisition (Canellas & Olivares, 2014; Pizzeghello et al., 2020; Shafi et al., 2020). Another strategy involves polymer coatings, which slow fertilizer dissolution and reduce losses by precipitation and adsorption (D. Guelfi et al., 2022; Kassem et al., 2022; Lyons & Genc, 2016).

Although positive outcomes have been reported in several crops and edaphoclimatic conditions (Adani et al., 2008; D. R. Guelfi et al., 2018; Pizzeghello et al., 2020), other studies question the universal effectiveness of these technologies, emphasizing the strong dependence on soil properties and management practices (Nunes et al., 2022; Volf & Rosolem, 2021). Thus, uncertainties remain regarding their actual contribution to improving agronomic P efficiency under field conditions.

Therefore, the objective of this study was to evaluate the efficiency of two additives associated with monoammonium phosphate (MAP) — a humic-based product (PhytohumusBio<sup>®</sup>) and a polymer-coated fertilizer (KimcoatBioHP<sup>®</sup>) — on soybean and maize grown under field conditions.

## 7.2 MATERIALS AND METHODS

### 7.2.1 Experimental site and soil characterization

Two field experiments were carried out in Rio Verde, Goiás, Brazil (17°45'56" S, 51°02'00" W; 841 m a.s.l.), on a dystrophic Latossolo Vermelho (Oxisol, Ferralsol) (Santos et al., 2018). The climate is Aw (Köppen), with marked rainy and dry seasons (Alvares et al., 2013). The first experiment was carried out with soybean (*Glycine max* L.) in the 2020/2021 growing season, and the second with maize (*Zea mays* L.) in the subsequent second season (2021), in adjacent areas to avoid treatment interference.

Composite soil samples (0–0.20 m) were collected for chemical and physical characterization prior to sowing. The soil presented pH (CaCl<sub>2</sub>) 5.3, P (Mehlich I) 9.7 mg dm<sup>-3</sup>, K 125 mg dm<sup>-3</sup>, Ca 3.3 cmolc dm<sup>-3</sup>, Mg 0.9 cmolc dm<sup>-3</sup>, H+Al 3.2 cmolc dm<sup>-3</sup>, organic matter 24 g kg<sup>-1</sup>, and texture with 25% clay, 4% silt, and 71% sand.

### 7.2.2 Soybean Experiment

The experiment was arranged in a randomized complete block design (RCBD) with a 2 × 6 factorial arrangement, consisting of two fertilizer application methods (broadcast and in-furrow) and six rates of PhytohumusBio<sup>®</sup> (0, 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, and 7.5 kg Mg<sup>-1</sup> MAP), with four replications. Each experimental plot consisted of 12 soybean rows spaced 0.5 m apart and 50 m in length, totaling 300 m<sup>2</sup>. Each plot represented one replication.

For evaluations, ten sampling points were randomly established within each plot. At each sampling point, three adjacent rows, each 3 m in length, were collected. The two outermost rows and 1 m at each end of the plot were excluded to minimize border

effects. Data from the ten sampling points were averaged to obtain a representative value for each plot.

Fertilizer treatments applied in-furrow were mechanically delivered at sowing, positioned 7 cm below the soil surface and 5 cm beneath and 3 cm laterally from the seed. For treatments with broadcast applications, fertilizers were uniformly distributed by hand. All factorial treatments received 43.7 kg P ha<sup>-1</sup> (equivalent to 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>) supplied as monoammonium phosphate (MAP; 11% N and 51% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), whereas control plots received no fertilizer or additive. The soybean cultivar CZ48B32IPRO RR2 CredeZ<sup>®</sup> (BASF) was sown at a density of 240,000 plants ha<sup>-1</sup>.

At 16 days after treatment application and sowing, soil samples were collected from the 0–0.10 m depth to evaluate soil P availability using the Mehlich-1 and Mehlich-3 extraction methods. For each plot, ten individual soil cores were collected and combined to form one composite sample representative of the plot. Each individual sample was taken from a soybean row, encompassing the space between two adjacent rows, and all soil was collected to a depth of 0.10 m. After sampling, the ten individual cores were thoroughly homogenized, and a 0.5 kg subsample was taken for chemical analysis.

When soybean plants reached the R1–R2 growth stages, leaf sampling was conducted to assess the plant nutritional status through chemical analysis of leaf nutrient concentrations (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Fe, Mn, and Zn) (Donagema et al., 2011; Malavolta et al., 1997) For each plot, ten sampling points were randomly selected, and at each point, ten fully expanded trifoliolate leaves were collected, totaling 100 trifoliolate leaves per plot. The sampled trifoliolate corresponded to the first fully expanded leaf, representing the third to fourth trifoliolate from the plant apex. Petioles were removed, and the leaves were washed with running tap water to eliminate dust and soil particles.

Subsequently, samples were rinsed with distilled water, blotted dry with paper towels, placed in kraft paper bags, and oven-dried in a forced-air circulation oven at 65–70 °C until constant weight. Dried samples were ground in a Wiley-type mill equipped with a 2 mm sieve and used for chemical analyses.

Three digestion procedures were performed. Sulfuric acid digestion on a block digester was used to determine total N, followed by distillation using a micro-Kjeldahl apparatus and titration with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Wet digestion using the nitro-perchloric method was performed for the determination of P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, and Zn. Dry ashing was conducted in a muffle furnace at 500 °C for 3 h for B determination. Phosphorus was quantified colorimetrically using the molybdenum blue method; K was determined by flame photometry; Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, and Zn were determined by atomic absorption spectrophotometry; S was determined turbidimetrically by the formation of barium sulfate; and B was determined colorimetrically.

At harvest, three rows of 3 m in length were collected at ten points within each plot. At each point, plants were harvested and mechanically threshed. Grain samples from each point were analyzed in triplicate to determine grain moisture content, which was used to estimate grain yield after correcting moisture to 13%. In the same grain samples, the mean weight of 100 grains was determined in triplicate, and the weight of 1,000 grains was subsequently estimated for each sampling point. The data obtained from the ten sampling points within each plot were averaged to determine the mean grain yield and 1,000-grain weight per plot, both adjusted to 13% moisture content.

Agronomic efficiency (AE) and phosphorus use efficiency (PUE) for the soybean experiments were estimated according to Eqs. [1] and [2], where AE is the agronomic efficiency;  $GY_{\text{treatment}}$  is the grain yield of the treatment with the applied rate of

PhytohumusBio<sup>®</sup>;  $GY_{\text{Control}}$  is the grain yield of the control treatment (0 rate of PhytohumusBio<sup>®</sup>); and  $P_{\text{Dose}}$  is the applied P rate ( $\text{kg ha}^{-1}$  of  $\text{P}_2\text{O}_5$ ).

$$AE = \left( \frac{GY_{\text{Treatment}} - GY_{\text{Control}}}{GY_{\text{Control}}} \right) 100 \dots\dots\dots \text{(Equation 1)}$$

$$PUE = \frac{GY_{\text{Treatment}} - GY_{\text{Control}}}{P_{\text{Dose}}} \dots\dots\dots \text{(Equation 2)}$$

### 7.2.3 Maize Experiment

The experiment was conducted at the same site of soybean trial. A randomized complete block design (RCBD) was used in a  $2 \times 4 + 1$  factorial arrangement with four replications. Treatments consisted of two fertilizer sources: monoammonium phosphate (MAP) and MAP coated with KimcoatBioHP<sup>®</sup> (a polymer-based additive containing dispersant, dye, and 50%  $\text{CaCO}_3$  with 16% Ca), combined with four P rates (70, 85, 100, and 115% of the recommended rate, corresponding to 56, 68, 80, and 92  $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ), plus an unfertilized control.

The maize hybrid NK555 VIP3 (Syngenta<sup>®</sup>) was sown at a density of 60,000 plants  $\text{ha}^{-1}$ . Each experimental plot consisted of 12 maize rows spaced 0.5 m apart and 10 m in length, totaling 60  $\text{m}^2$ . For evaluations, the two outer rows and 1 m at each end of the plot were excluded, resulting in a net plot area of 32  $\text{m}^2$ . All measurements and samplings were performed within the net plot area.

Basal fertilization at planting included 30  $\text{kg N ha}^{-1}$  and 30  $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ . Topdressing was applied at 20 and 40 days after sowing, with 250  $\text{kg ha}^{-1}$  of 20-0-20 (N-K<sub>2</sub>O) and 150  $\text{kg ha}^{-1}$  urea, respectively.

At harvest, all plants within the net plot area were collected. The plants were separated into components, and the grains were mechanically threshed. Grain moisture content was determined in triplicate. Grain yield was calculated based on the grain weight adjusted to 13% moisture. From the harvested grains, three subsamples of 100 grains each were weighed to determine the mean 100-grain weight, and the 1,000-grain weight was subsequently estimated, both corrected to 13% moisture.

For the maize experiment, agronomic efficiency (AE) and phosphorus use efficiency (PUE) were also estimated according to Eqs. [1] and [2]. However, for the maize trial, GY<sub>control</sub> corresponded to the grain yield of the unfertilized control treatment (without P fertilization).

In the fourth central row of each plot, the following parameters were evaluated: stem diameter at the soil surface, shoot dry mass, number of kernel rows per ear, number of kernels per row, and grain weight. The amount of dry crop residue (stover) per treatment was also estimated, considering the ear without grains as part of the shoot dry mass. Grain and stover samples were ground, and plant tissue P concentration was determined according to Embrapa Solos (EMBRAPA, 2009) to estimate P accumulation in both stover and grain, the latter representing P export. In addition, grain and stover moisture and total P accumulation were determined according to Malavolta (Malavolta et al., 1997).

A simplified phosphorus balance was then calculated using Eq. [3]:

$$P_{\text{Balance}} = P_{\text{Dose}} - (P_{\text{Exp}} + P_{\text{Stover}}) \dots \dots \dots \text{(Equation 3)}$$

where PBalance is the phosphorus balance ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), PDose is the applied P rate ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), PExp is the P exported in grains ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), and PCorn\_Stover is the P accumulated in corn stover ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

#### **7.2.4 Statistical Analysis**

Data obtained from the soybean experiment were subjected to analysis of variance (ANOVA) and regression modeling as a function of PhytohumusBio<sup>®</sup> rates. To compare the fertilizer application methods, model identity analysis was performed using multivariate techniques based on principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis.

Data obtained from the maize experiment were also subjected to analysis of variance (ANOVA) and regression modeling as a function of P rates. To compare the effects of fertilizer sources (MAP and MAP coated with KimcoatBioHP<sup>®</sup>), model identity analysis was performed using multivariate techniques based on principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis.

All statistical analyses were conducted in R software (R Core Team, 2021) using the *ExpDes* (Ferreira et al., 2021) and *FactoMineR* (Lê et al., 2008) packages. All fitted models were significant according to the F-test at the 1% and 5% probability levels.

### **7.3 RESULTS AND DISCUSSION**

#### **7.3.1 Soybean Experiment**

The PhytohumusBio<sup>®</sup> addition influenced soil P availability and soybean performance. Soil analyses showed higher available P when MAP was applied in rows compared to broadcast application, as determined by Mehlich I (Figure 1A). In contrast, no significant differences were detected with Mehlich III (Figure 1B), indicating that

the extractant sensitivity can affect P detection. Concentration of P near the root zone under row application likely improved P uptake under the initial dry spell, highlighting the importance of fertilizer placement in highly weathered, clay-rich tropical soils, where strong P fixation limits its mobility. Leaf nutrient concentrations followed similar trends to soil P availability, particularly for P and K, confirming the influence of fertilizer placement on plant nutrition (Fig. S1, Supplementary Material).

Grain yield and its components were positively affected by increasing PhytohumusBio<sup>®</sup> doses (Figure 2E). Yield gains translated into higher agronomic efficiency (AE) and P use efficiency (PUE) (Figures 2F and 2G), confirming the potential of humic substances to enhance P utilization. Although the number of pods per plant and 1000-grain weight showed minor variations, yield improvement was consistent across application methods.

The positive response of soybean to PhytohumusBio<sup>®</sup> aligns with reports that humic substances and *Ascophyllum nodosum* extracts stimulate root growth, rhizosphere activity, and symbiotic associations, thereby increasing nutrient uptake and crop productivity (Canellas & Olivares, 2014; Sauvu-Jonasse et al., 2020; Wozniak et al., 2020). Enhanced root development and microbial interactions are considered key mechanisms behind the improved P efficiency observed in this study.

Despite the reduction in some micronutrient concentrations, especially under broadcast application, all values remained within sufficiency ranges. These shifts may result from complexation reactions between humic acids and cationic micronutrients or precipitation with phosphate ions (He et al., 2021; Moreno-Lora & Delgado, 2020). Importantly, such changes did not impair soybean yield.

Overall, PhytohumusBio<sup>®</sup> increased soybean grain yield by up to 549 kg ha<sup>-1</sup> at the highest tested dose, confirming its role as a promising strategy to improve agronomic efficiency of P fertilizers in tropical conditions.

### 7.3.2 Maize Experiment

At the vegetative stage, shoot and total dry matter were affected by MAP with or without polymer coating (Kimcoat BioHP<sup>®</sup>) and by P rates, with fertilized treatments differing from unfertilized control, without model adjustment (Figure 3). Root dry matter varied only with fertilizer source, with higher values under conventional MAP compared to MAP coated with KimcoatBioHP<sup>®</sup>. These results indicate that polymer coating limited early P availability, reducing initial plant growth. Similar observations have been reported under tropical conditions, although positive responses to polymer-coated MAP have been observed in other environments (de Figueiredo et al., 2012; Guareschi et al., 2011).

Grain yield and related components were strongly affected by environmental stress. Severe drought during grain set and a frost event during grain filling (Fig. S4, Supplementary Material) reduced yield potential across treatments. Consequently, no positive effect of KimcoatBioHP<sup>®</sup> was detected, and increasing P doses reduced yield and agronomic efficiency (AE) (Figure 4D). Biomass partitioning confirmed these trends: stover production increased under MAP, but without gains in grain yield (Figure 4A). As a result, P use efficiency (PUE) declined with higher P rates (Figure 4D). Non-destructive physiological indices, including chlorophyll and fluorescence parameters, also varied among treatments but did not translate into yield differences under the stress conditions experienced (Figs. S2 and S3, Supplementary Material).

Leaf and stover P accumulation were not significantly altered by treatments, with leaf P concentrations remaining within sufficiency ranges (Figure 5A–B). However, the simplified P balance increased with P rates, driven mainly by higher stover accumulation and reduced grain export (Figure 5C–D). This finding suggests that under stress conditions, a larger fraction of applied P remained in crop residues, contributing to a potential “legacy P” effect (Pavinato et al., 2020; Zhu et al., 2018).

Overall, the polymer-coated MAP reduced early vegetative growth without improving grain yield under stress conditions. The results highlight the strong dependence of P fertilizer efficiency on edaphoclimatic factors, particularly in tropical second-season maize. While humic-based additives improved soybean performance, polymer coating did not enhance maize productivity under unfavorable conditions, underscoring the need for technologies targeting both soil P legacy and environmental resilience. The combined effects of drought and frost during reproductive stages largely explained the lack of yield response to P fertilization (Fig. S4, Supplementary Material).

### **7.3.3 Comparative Synthesis: Soybean vs. Maize**

Contrasting responses were observed between soybean and maize when MAP was combined with efficiency-enhancing additives. In soybean, the application of PhytohumusBio<sup>®</sup> increased soil P availability (Figure 1) and promoted consistent gains in grain yield, agronomic efficiency, and P use efficiency (Figure 2). These results highlight the ability of humic substances and *Ascophyllum nodosum* extracts to stimulate root growth, symbiotic associations, and nutrient uptake, leading to improved crop performance under tropical field conditions.

In maize, however, the MAP coated with KimcoatBioHP<sup>®</sup> reduced early vegetative growth (Figure 3) and did not translate into yield improvements (Figure 4).

Environmental constraints, including drought and frost during reproductive stages (Fig. S4, Supplementary Material), further limited the crop's capacity to respond to P fertilization. Consequently, a larger share of applied P was retained in stover, increasing the positive P balance in the system (Figure 5) but without improving agronomic outcomes.

Together, these findings demonstrate that the effectiveness of fertilizer additives is strongly crop- and environment-dependent. While humic-based technologies can enhance P use efficiency in soybean, polymer-coated MAP may not be advantageous for maize under stressful edaphoclimatic conditions. These results reinforce the need to tailor additive use according to crop physiology, soil P legacy, and local climate variability to maximize the efficiency and sustainability of phosphate fertilization in tropical agriculture.

#### **7.4 CONCLUSIONS**

The integration of humic-based additives with MAP improved soybean performance, increasing grain yield by up to 549 kg ha<sup>-1</sup> and enhancing P use efficiency under field conditions. In contrast, the polymer-coated MAP reduced early maize growth and, under drought and frost stress (Supplementary Fig. S4), decreased grain yield by 28%, leading to higher P retention in crop residues. These results demonstrate that the effectiveness of P fertilizer additives is crop- and environment-dependent, with humic substances offering greater potential for soybean in tropical systems. Future strategies should focus on aligning fertilizer technologies with soil P legacy and climate resilience to improve sustainability in phosphate fertilization and to guide fertilizer recommendations in tropical agriculture.

## SUPPLEMENTAL MATERIAL

Supplementary Figures S1–S4 accompany this article. Supplementary Figures provide additional soil and leaf nutrient concentrations (Fig. S1), physiological indices obtained with Dualex<sup>®</sup>, SPAD<sup>®</sup>, Clorofilog<sup>®</sup>, and Fluorpen<sup>®</sup> devices (Figs. S2–S3), and environmental stress records (Fig. S4). These materials are available online and complement the results presented in the main text.

## REFERENCES

- Adani, F., Genevini, P., Zaccheo, P., & Zocchi, G. (2008). The effect of commercial humic acid on tomato plant growth and mineral nutrition. *Journal of Plant Nutrition*, 21(3), 561–575. <https://doi.org/10.1080/01904169809365424>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., De Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Canellas, L. P., & Olivares, F. L. (2014). Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 1(1), 3. <https://doi.org/10.1186/2196-5641-1-3>
- de Figueiredo, C. C., Barbosa, D. V., de Oliveira, S. A., Fagioli, M., & Sato, J. H. (2012). Polymer-coated phosphate fertilizer and liming on the production and morphological parameters of corn. *Revista Ciência Agronômica*, 43(3), 446–452. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000300005>
- Donagema, G. K., Campos, D. V. B., Calderano S. B., Teixeira, W. G., & Viana, J. H. M. (2011). *Manual de métodos de análise de solo* (EMBRAPA, Ed.).
- EMBRAPA. (2009). *Manual De Análises Químicas De Solos, Plantas E Fertilizantes* (F. C. Silva, Ed.; 2nd ed.).
- Ferreira, E. B., Cavalcanti, P. P., & Nogueira, D. A. (2021). *ExpDes.pt: Pacote experimental designs*. (Version R Package Version 1.2.0) [Computer software]. R Foundation. <https://cran.r-project.org/package=ExpDes.pt>
- Fink, J. R., Vasconcellos Inda, A., & Barrón, V. (2016). Review: Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability Óxidos de ferro e matéria orgânica na disponibilidade de fósforo no solo. *Ciência e Agrotecnologia*, 40(4).
- Guareschi, R. F., Gazolla, P. R., Perin, A., & Santini, J. M. K. (2011). Adubação antecipada na cultura da soja com superfosfato triplo e cloreto de potássio revestidos por polímeros. *Ciência e Agrotecnologia*, 35(4), 643–648. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000400001>
- Guelfi, D., Nunes, A. P. P., Sarkis, L. F., & Oliveira, D. P. (2022). Innovative Phosphate Fertilizer Technologies to Improve Phosphorus Use Efficiency in Agriculture. *Sustainability (Switzerland)*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/SU142114266>

- Guelfi, D. R., Chagas, W. F. T., Lacerda, J. R., Chagas, R. M. R., de Souza, T. L., & Andrade, A. B. (2018). Monoammonium phosphate coated with polymers and magnesium for coffee plants. *Ciência e Agrotecnologia*, 42(3), 261–270. <https://doi.org/10.1590/1413-70542018423002918>
- He, H., Wu, M., Su, R., Zhang, Z., Chang, C., Peng, Q., Dong, Z., Pang, J., & Lambers, H. (2021). Strong phosphorus (P)-zinc (Zn) interactions in a calcareous soil-alfalfa system suggest that rational P fertilization should be considered for Zn biofortification on Zn-deficient soils and phytoremediation of Zn-contaminated soils. *Plant and Soil*, 461, 119–134. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04793-w>
- Hou, E., Tang, S., Chen, C., Kuang, Y., Lu, X., Heenan, M., & Wen, D. (2018). Solubility of phosphorus in subtropical forest soils as influenced by low-molecular organic acids and key soil properties. *Geoderma*, 313, 172–180. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2017.10.039>
- Kassem, I., Ablouh, E. H., El Bouchtaoui, F. Z., Kassab, Z., Hannache, H., Sehaqui, H., & El Achaby, M. (2022). Biodegradable all-cellulose composite hydrogel as eco-friendly and efficient coating material for slow-release MAP fertilizer. *Progress in Organic Coatings*, 162, 106575. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCcoat.2021.106575>
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25, 1–18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Lyons, G., & Genc, Y. (2016). Commercial humates in agriculture: real substance or smoke and mirrors? *Agronomy* 2016, Vol. 6, Page 50, 6(4), 50. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY6040050>
- Malavolta, E., Vitti, G. C., & Oliveira, S. A. de. (1997). Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. POTAFOS. <https://repositorio.usp.br/item/001070906>
- Moreno-Lora, A., & Delgado, A. (2020). Factors determining Zn availability and uptake by plants in soils developed under Mediterranean climate. *Geoderma*, 376. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2020.114509>
- Novais, R. F., & Smyth, T. J. (1999). Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Universidade Federal de Viçosa.
- Nunes, A. P. P., Santos, C. F., & Guelfi, D. (2022). Interfaces between biodegradable organic matrices coating and MAP fertilizer for improve use efficiency. *Science of The Total Environment*, 804, 149896. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.149896>
- Pavinato, P. S., Cherubin, M. R., Soltangheisi, A., Rocha, G. C., Chadwick, D. R., & Jones, D. L. (2020). Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. *Scientific Reports* 2020 10:1, 10(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72302-1>
- Pizzeghello, D., Schiavon, M., Francioso, O., Dalla Vecchia, F., Ertani, A., & Nardi, S. (2020). Bioactivity of Size-Fractionated and Unfractionated Humic Substances From Two Forest Soils and Comparative Effects on N and S Metabolism, Nutrition, and Root Anatomy of *Allium sativum* L. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1203. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.01203>

- R Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing (Version 4.1). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/> [Computer software].
- Rodrigues, M., Pavinato, P. S., Withers, P. J. A., Teles, A. P. B., & Herrera, W. F. B. (2016). Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. *Science of The Total Environment*, 542, 1050–1061. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.08.118>
- Santos, H. G. dos, Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C. dos, Oliveira, V. A. de, Lumberras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A. de, Araújo Filho, J. C. de, Oliveira, J. B. de, & Cunha, T. J. F. (2018). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (5th ed.). Embrapa. In E-book. EMBRAPA. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094001/brazilian-soil-classification-system>
- Sauvu-Jonasse, C., Nápoles-García, M. C., Falcón-Rodríguez, A. B., Lamz-Piedra, A., Ruiz-Sánchez, M., Nápoles-García, C., & Ruiz-Sánchez, M. (2020). Bioestimulants in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) growing and yield. *Cultivos Tropicales*, 41(3). <https://www.redalyc.org/journal/1932/193266151002/html/>
- Shafi, M. I., Adnan, M., Fahad, S., Wahid, F., Khan, A., Yue, Z., Danish, S., Zafar-Ul-Hye, M., Brtnicky, M., & Datta, R. (2020). Application of Single Superphosphate with Humic Acid Improves the Growth, Yield and Phosphorus Uptake of Wheat (*Triticum aestivum* L.) in Calcareous Soil. *Agronomy* 2020, Vol. 10, Page 1224, 10(9), 1224. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10091224>
- Volf, M. R., & Rosolem, C. A. (2021). Soil P Diffusion and Availability Modified by Controlled-Release P Fertilizers. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(1), 162–172. <https://doi.org/10.1007/S42729-020-00350-7>
- Withers, P. J. A., Rodrigues, M., Soltangheisi, A., de Carvalho, T. S., Guilherme, L. R. G., Benites, V. de M., Gatiboni, L. C., de Sousa, D. M. G., Nunes, R. de S., Rosolem, C. A., Andreote, F. D., Oliveira, A. de, Coutinho, E. L. M., & Pavinato, P. S. (2018). Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. *Scientific Reports*, 8(1), 2537. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20887-z>
- Wozniak, E., Blaszczyk, A., Wiatrak, P., & Canady, M. (2020). Biostimulant mode of action: impact of biostimulant on whole-plant level. In D. Geelen & L. Xu (Eds), *The Chemical Biology of Plant Biostimulants* (1st edn, pp. 205–227). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119357254.ch8>
- Zhu, J., Li, M., & Whelan, M. (2018). Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. *Science of The Total Environment*, 612, 522–537. <https://doi.org/10.1016/J.scitotenv.2017.08.095>

### FIGURE CAPTIONS

Figure 1. Available soil phosphorus (P) determined by Mehlich I (P-MI) (A) and Mehlich III (P-MIII) (B) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), 15 days after sowing and fertilizer application, in samples collected from 0–0.1 m depth in function of PhytohumusBio<sup>®</sup> doses applied with MAP under broadcast and row placement. Rio Verde, GO, Brazil, 2021. Means followed by the same uppercase letter do not differ between application methods (Broadcast vs. Row) according to Tukey's test ( $p \leq 0.15$ ).

Figure 2. Plant height (PH, cm) (A), stem diameter (SD, mm) (B), number of pods per plant (NP, pods plant<sup>-1</sup>) (C), thousand grain weight (TGW, g) (D), grain yield (GY, kg ha<sup>-1</sup>) (E), agronomic efficiency (AE, %) (F), and phosphorus use efficiency (PUE, kg kg<sup>-1</sup>) (G) of soybean cultivar CZ48B32IPRO RR2 Credenz<sup>®</sup> in function of PhytohumusBio<sup>®</sup> doses applied with MAP under broadcast and row placement. Rio Verde, GO, Brazil, 2021. Means followed by the same uppercase letter do not differ between application methods according to Tukey's test ( $p \leq 0.15$ ).

Figure 3. Early maize growth (cv. NK555 VIP3) at 20 days after sowing under different P sources and doses: shoot dry mass (SDM, g plant<sup>-1</sup>) and root dry mass (RDM, g plant<sup>-1</sup>). Values above each column represent total dry mass (TDM, g plant<sup>-1</sup>). Means followed by different letters differ significantly according to Tukey's test ( $p \leq 0.05$ ). \*\*, \*, and ns indicate significance at 1%, 5%, and non-significance, respectively, according to the F-test comparing treatments and control.

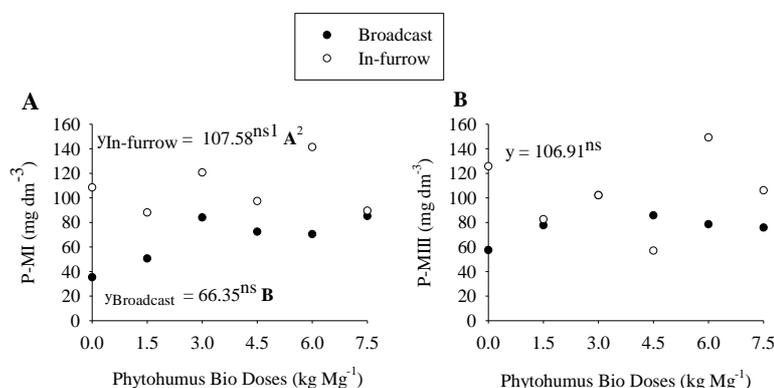
Figure 4. Maize biometric parameters at harvest: stover dry mass (Stover, kg ha<sup>-1</sup>) (A), grain rows per ear (Rows ear<sup>-1</sup>) (B), grains per row (Grains row<sup>-1</sup>) (C), grain yield (GY, kg ha<sup>-1</sup>) (D), agronomic efficiency (AE, %) (E), and phosphorus use efficiency (PUE,

kg kg<sup>-1</sup>) (F) under different P sources and doses in the 2021 second season, Rio Verde, GO, Brazil. Means followed by different letters differ significantly according to Tukey's test ( $p \leq 0.05$ ). \*\*, \*, and ns indicate significance at 1%, 5%, and non-significance, respectively, according to the F-test comparing treatments and control.

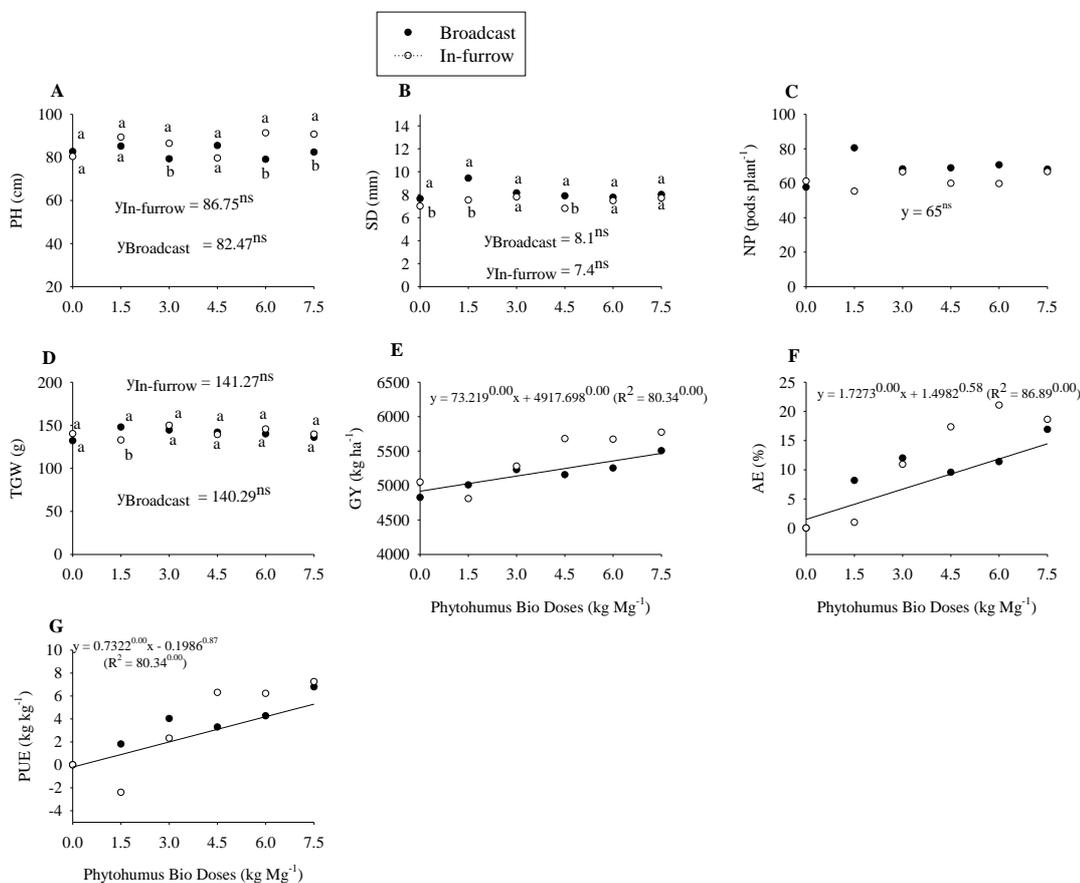
Figure 5. Leaf phosphorus concentration (Leaf P, g kg<sup>-1</sup>) (A) and phosphorus accumulation in stover (P stover, kg ha<sup>-1</sup>) (B) of maize plants fertilized with different P sources and doses (kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) in the 2021 second season; simplified phosphorus balance in the cropping system (P balance, kg ha<sup>-1</sup>) (C, D). Rio Verde, GO, Brazil. Means followed by different letters differ significantly according to Tukey's test ( $p \leq 0.05$ ). \*\*, \*, and ns indicate significance at 1%, 5%, and non-significance, respectively, according to the F-test comparing treatments and control.

## FIGURES

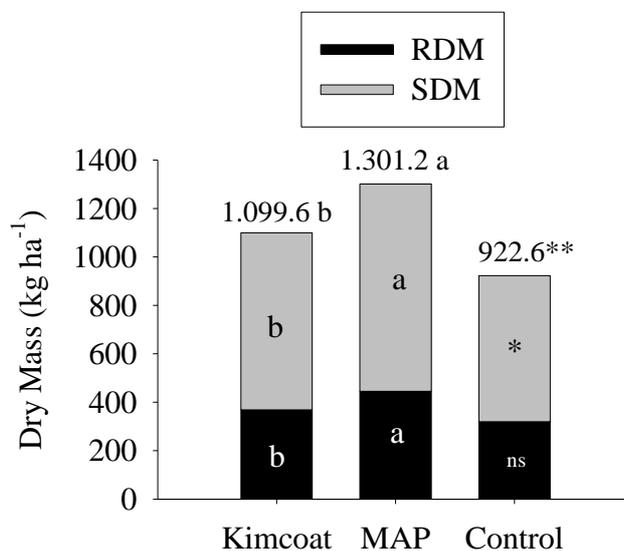
**Figure 1.** Available soil phosphorus (P) determined by Mehlich I (P-MI) (A) and Mehlich III (P-MIII) (B) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), 15 days after sowing and fertilizer application, in samples collected from 0–0.1 m depth in function of PhytohumusBio<sup>®</sup> doses applied with MAP under broadcast and row placement. Rio Verde, GO, Brazil, 2021. Means followed by the same uppercase letter do not differ between application methods (Broadcast vs. Row) according to Tukey's test ( $p \leq 0.15$ ).



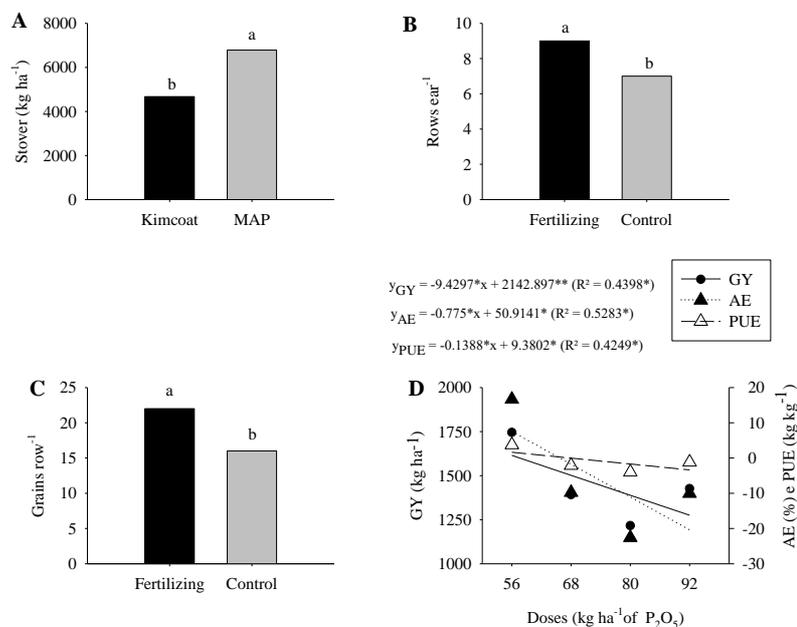
**Figure 2.** Plant height (PH, cm) (A), stem diameter (SD, mm) (B), number of pods per plant (NP, pods plant<sup>-1</sup>) (C), thousand grain weight (TGW, g) (D), grain yield (GY,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) (E), agronomic efficiency (AE, %) (F), and phosphorus use efficiency (PUE,  $\text{kg kg}^{-1}$ ) (G) of soybean cultivar CZ48B32IPRO RR2 Credenz<sup>®</sup> in function of PhytohumusBio<sup>®</sup> doses applied with MAP under broadcast and row placement. Rio Verde, GO, Brazil, 2021. Means followed by the same uppercase letter do not differ between application methods according to Tukey's test ( $p \leq 0.15$ ).



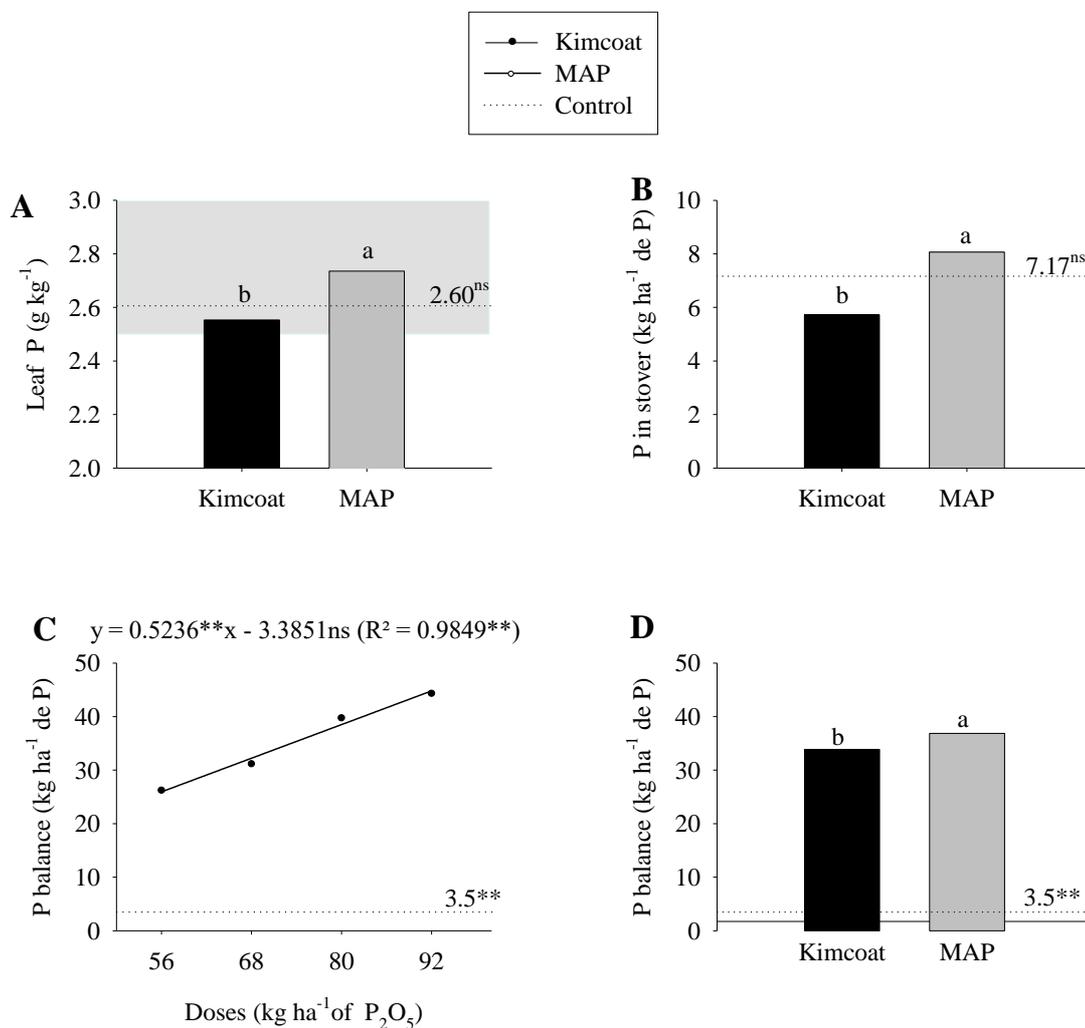
**Figure 3.** Early maize growth (cv. NK555 VIP3) at 20 days after sowing under different P sources and doses: shoot dry mass (SDM, g plant<sup>-1</sup>) and root dry mass (RDM, g plant<sup>-1</sup>). Values above each column represent total dry mass (TDM, g plant<sup>-1</sup>). Means followed by different letters differ significantly according to Tukey's test ( $p \leq 0.05$ ). \*\*, \*, and ns indicate significance at 1%, 5%, and non-significance, respectively, according to the F-test comparing treatments and control.



**Figure 4.** Maize biometric parameters at harvest: stover dry mass (Stover, kg ha<sup>-1</sup>) (A), grain rows per ear (Rows ear<sup>-1</sup>) (B), grains per row (Grains row<sup>-1</sup>) (C), grain yield (GY, kg ha<sup>-1</sup>) (D), agronomic efficiency (AE, %) (E), and phosphorus use efficiency (PUE, kg kg<sup>-1</sup>) (F) under different P sources and doses in the 2021 second season, Rio Verde, GO, Brazil. Means followed by different letters differ significantly according to Tukey's test ( $p \leq 0.05$ ). \*\*, \*, and ns indicate significance at 1%, 5%, and non-significance, respectively, according to the F-test comparing treatments and control.

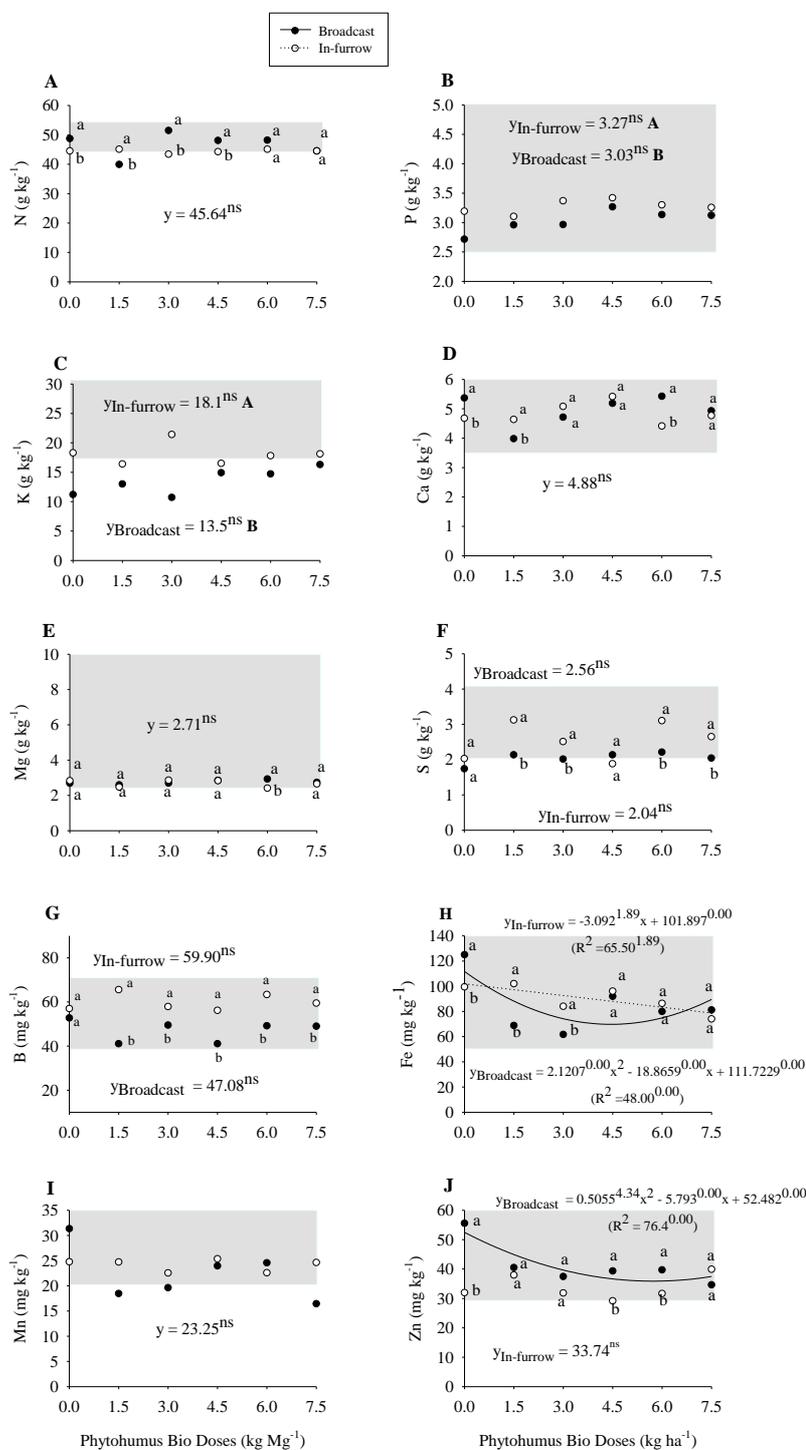


**Figure 5.** Leaf phosphorus concentration (Leaf P,  $\text{g kg}^{-1}$ ) (A) and phosphorus accumulation in stover (P stover,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) (B) of maize plants fertilized with different P sources and doses ( $\text{kg ha}^{-1} \text{P}_2\text{O}_5$ ) in the 2021 second season; simplified phosphorus balance in the cropping system (P balance,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) (C, D). Rio Verde, GO, Brazil. Means followed by different letters differ significantly according to Tukey's test ( $p \leq 0.05$ ). \*\*, \*, and ns indicate significance at 1%, 5%, and non-significance, respectively, according to the F-test comparing treatments and control.

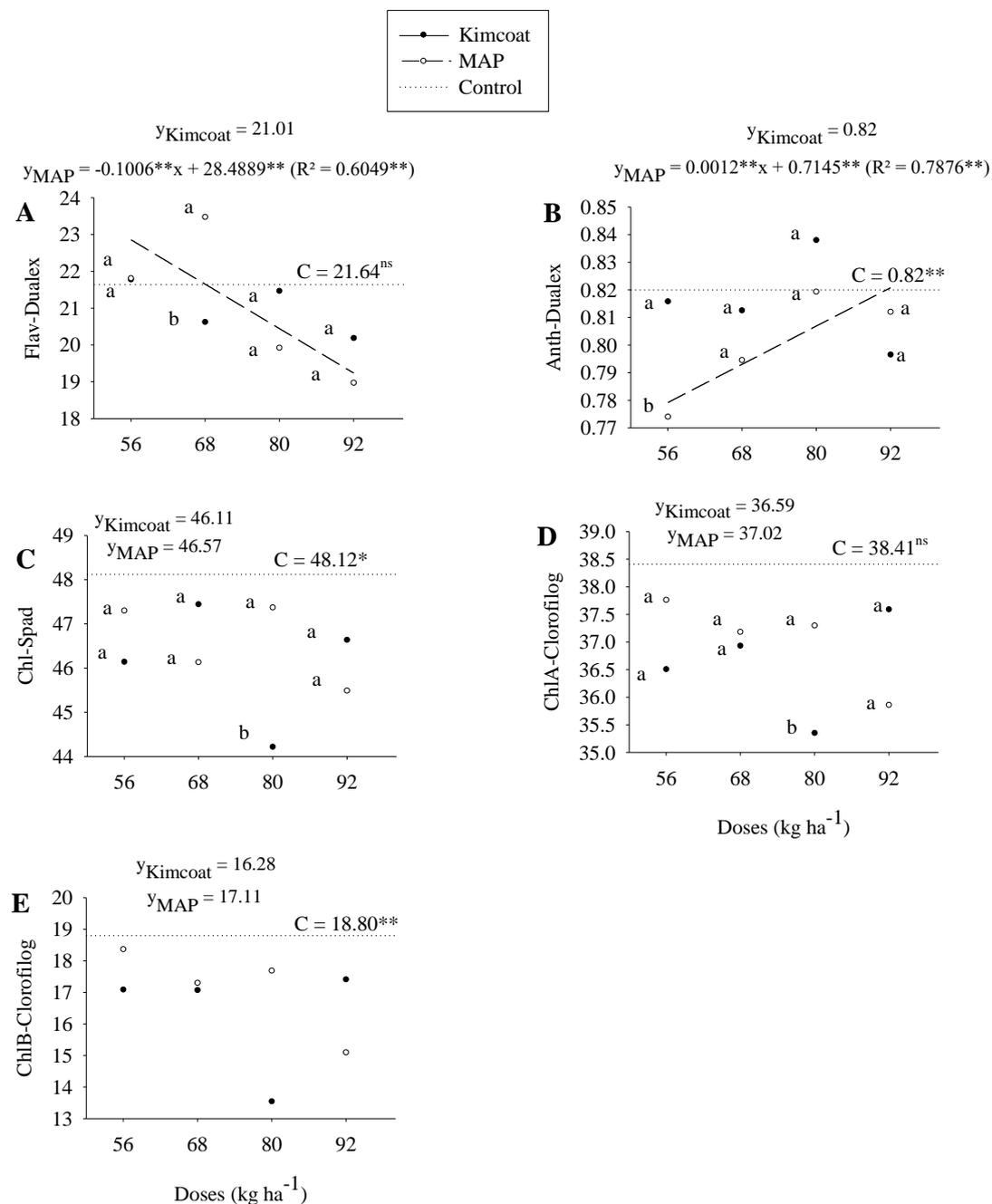


## SUPPLEMENTAL MATERIAL

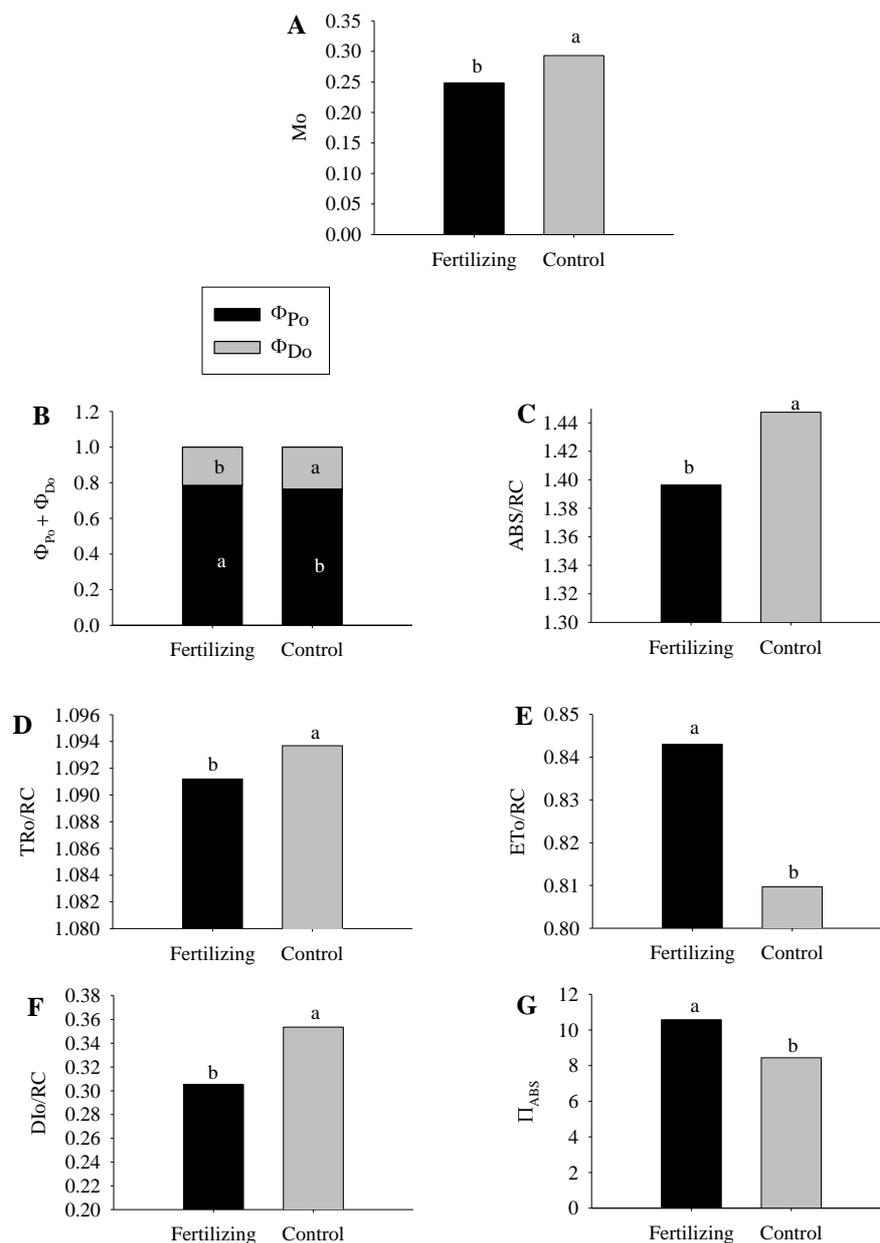
**Figure S1.** Leaf nutrient concentrations (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Fe, Mn, Zn) of soybean cultivar CZ48B32IPRO RR2 CredeZ® (BASF) at the R1–R2 stage, in function of Phytohumus Bio® doses combined with MAP applied either by broadcasting or in rows, 2020/2021 season. Means followed by different letters differ significantly according to Tukey's test at 5% probability. \*\*, \*, and ns indicate significance at 1% and 5%, and non-significance, respectively, according to the F-test comparing treatments and control.



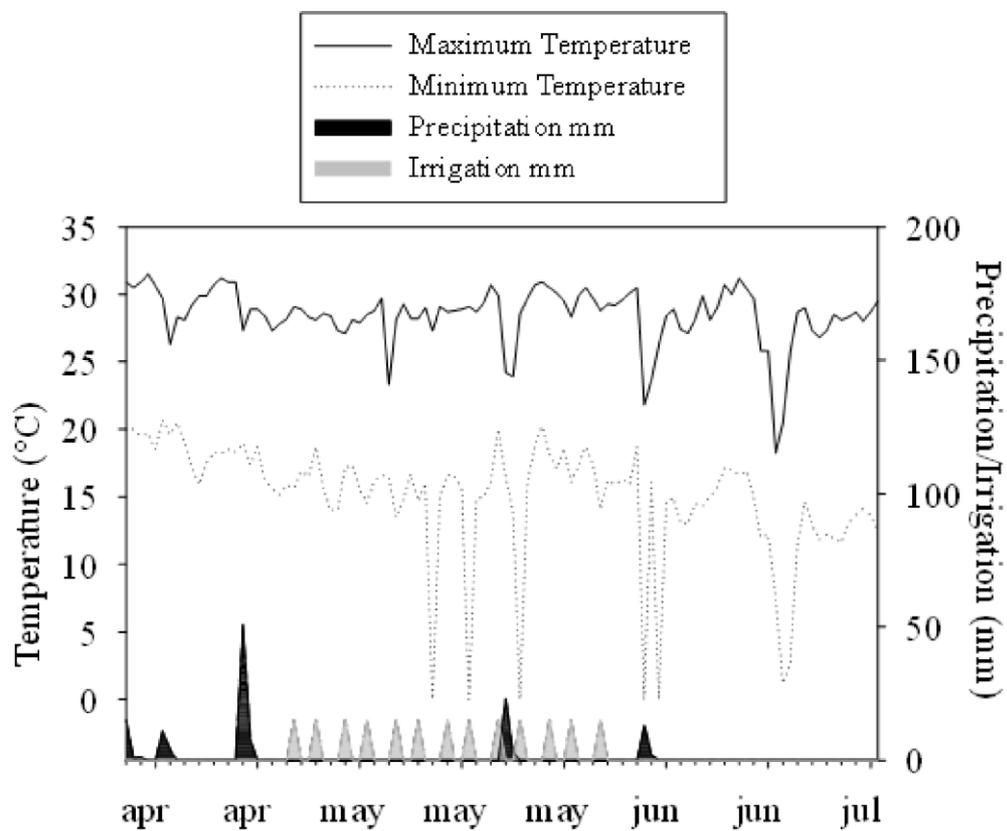
**Figure S2.** Non-destructive pigment indices obtained with Dualex®, SPAD®, and Clorofilog® sensors in second-season maize (cv. NK555 VIP3) under different P sources and rates: flavonoids (Flav-Dualex) (A), anthocyanins (Anth-Dualex) (B), chlorophyll content (Chl-SPAD) (C), chlorophyll a (ChlA-Clorofilog) (D), and chlorophyll b (ChlB-Clorofilog) (E). Means followed by different letters differ significantly according to Tukey's test at 5% probability. \*\*, \*, and ns indicate significance at 1% and 5%, and non-significance, respectively, according to the F-test comparing treatments and control.



**Figure S3.** Chlorophyll a fluorescence parameters measured with Fluorpen Max 100 in second-season maize (cv. NK555 VIP3) as affected by P sources and rates: net closure rate of PSII reaction centers ( $M_o$ ) (A), maximum quantum efficiency of PSII ( $\Phi_{Po}$ ) and energy dissipation as heat ( $\Phi_{Do}$ ) (B), absorbed photon flux by antenna complexes (ABS/RC) (C), trapped energy flux per reaction center (TRo/RC) (D), electron transport flux (ETo/RC) (E), dissipated energy flux as heat (DIo/RC) (F), and overall PSII performance index ( $\Pi_{ABS}$ ) (G). Means followed by different letters differ significantly according to Tukey's test at 5% probability. \*\*, \*, and ns indicate significance at 1% and 5%, and non-significance, respectively, according to the F-test comparing treatments and control.



**Figure S4.** Weather conditions during the maize experiment (second season 2021) in Rio Verde, Goiás: maximum and minimum air temperature, rainfall, and irrigation throughout the crop cycle.



## 8. CONCLUSÃO GERAL

A presente tese demonstrou que a eficiência dos fertilizantes fosfatados em ambientes tropicais é profundamente condicionada pelas características físico-químicas e mineralógicas do solo, as quais modulam a trajetória do fósforo entre pools lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis ao longo do tempo. A análise integrada dos três solos avaliados (LVAwf, NVe e RQo) evidenciou que a interação entre fonte, aditivo e atributos edáficos determina padrões distintos de solubilização, imobilização e estabilização do P, reforçando a necessidade de estratégias de manejo diferenciadas para cada sistema.

No Latossolo Vermelho-Amarelo acriférrico, a elevada reatividade da fração argila, dominada por goethita e gibbsita, promoveu rápida fixação do P aplicado, com forte migração para Pi-Fe+Al, Pi-NLábil e Pi-ocluído. Mesmo nesse ambiente restritivo, aditivos como o IFCoat foram capazes de reduzir a retrogradação inicial e prolongar a permanência do MAP em formas lábeis, estimulando também a ciclagem biológica. No Nitossolo Vermelho eutrófico, a dinâmica do P foi influenciada tanto por processos químicos quanto biológicos: o MAP associado ao KimcoatBioHP<sup>®</sup> mostrou maior capacidade de manter o P em Pi-Lábil e promover a transição entre Po-mic e Po-MLábil, enquanto o ST com IFCoat destacou-se pela liberação gradual e manutenção do P em formas acessíveis no período intermediário. Já no Neossolo Quartzarênico órtico, a combinação entre baixa CTC e mineralogia simples resultou em alta vulnerabilidade química, com rápida conversão do P lábil em formas fixadas. Embora o MAP com aditivos tenha aumentado o Pi-solução nas fases iniciais, esse efeito foi transitório. Além disso, o ST sem aditivo apresentou melhor desempenho a partir dos 90 dias, refletindo liberação mais gradual.

A modelagem de equações estruturais reforçou esses padrões ao integrar variáveis orgânicas e inorgânicas, revelando que: (i) no LVAwf, a disponibilidade é controlada principalmente por pools oclusos e pela forte ação dos óxidos de Fe e Al; (ii) no NVe, a microbiota atua como elemento central da ciclagem e da manutenção das frações lábeis;

e (iii) no RQo, a disponibilidade depende majoritariamente de frações inorgânicas de rápida transformação. A MEE evidenciou ainda que os aditivos modulam a cinética de liberação das fontes, aproximando o comportamento entre MAP e ST e reduzindo perdas imediatas.

Os experimentos de campo confirmaram que a eficiência dos aditivos é dependente da cultura e das condições ambientais. O uso de substâncias húmicas associadas ao MAP elevou a produtividade da soja e melhorou a eficiência de uso de P, enquanto o MAP revestido por polímeros reduziu o vigor inicial do milho e, sob estresse climático, diminuiu a produtividade, evidenciando a importância de alinhar a tecnologia de fertilizantes ao contexto climático e à sensibilidade das culturas.

De forma geral, os resultados desta tese indicam que o manejo inteligente do fósforo em solos tropicais deve considerar: (i) fontes solúveis como MAP, especialmente quando associadas a aditivos que modulam a liberação e reduzem a retrogradação inicial; (ii) estratégias diferenciadas entre solos, ajustando dose, época e forma de aplicação; (iii) o papel central da ciclagem microbiana na manutenção das frações lábeis; e (iv) a necessidade de sincronizar a oferta de P com a demanda das culturas, especialmente em solos arenosos e ambientes sujeitos a estresses climáticos. As evidências geradas contribuem para o avanço no entendimento dos processos que governam o ciclo do fósforo e fornecem bases para recomendações mais eficientes, sustentáveis e resilientes em sistemas agrícolas tropicais.