

2026

# Capacidade de tamponamento de fósforo em solos do Estado do Paraná

Inoue, Marcos Yassuhiro

Universidade Estadual do Norte do Paraná

INOUE, Marcos Yassuhiro. Capacidade de tamponamento de fósforo em solos do Estado do Paraná. Orientador: Oriel Tiago Kölln. 2026. 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Campus Luiz Meneghel, Universidade Estadual do Norte do Paraná, Bandeirantes, 2026.

<https://repositorio.uenp.edu.br/handle/123456789/919>

*Baixado de Repositório Institucional UENP*



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE DO PARANÁ**  
**CAMPUS LUIZ MENEGHEL**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**MESTRADO EM AGRONOMIA**

MARCOS YASSUHIRO INOUE

**CAPACIDADE DE TAMPONAMENTO DE FÓSFORO EM SOLOS**  
**DO ESTADO PARANÁ**

**BANDEIRANTES-PR**

**2026**

MARCOS YASSUHIRO INOUE

**CAPACIDADE DE TAMPONAMENTO DE FÓSFORO EM SOLOS  
DO ESTADO DO PARANÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Agronomia, da Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz Meneghel, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Oriel Tiago Kölln

**BANDEIRANTES-PR**

**2026**

Ficha catalográfica elaborada na Biblioteca do Campus "Luiz Meneghel", vinculada ao Sistema de Bibliotecas  
Universitárias da Universidade Estadual do Norte do Paraná (SBU-UENP)

**Catálogo-na-Publicação (CIP)**

---

- I587c Inoue, Marcos Yassuhiro.  
Capacidade de tamponamento de fósforo em solos do Estado do Paraná. – 2026.  
1 arquivo digital.
- Orientador: Prof. Dr. Oriel Tiago Kölln.  
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Norte do Paraná, Campus Luiz Meneghel, Centro de  
Ciências Agrárias, Programa de Pós-graduação em Agronomia, 2026.  
Inclui bibliografia.
1. Fósforo - Dissertação. 2. Adubação fosfatada - Dissertação. 3. Capacidade de tamponamento - Dissertação. 4. Solos  
tropicais - Dissertação. 5. Adsorção - Dissertação. I. Kölln, Oriel Tiago. II. Universidade Estadual do Norte do Paraná. Campus Luiz  
Meneghel. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-graduação em Agronomia. III. Título.

CDD: 631.8 (22.ed)

---

Bibliotecário Elisio Custodio Brentan Junior (CRB-9/1955)

MARCOS YASSUHIRO INOUE

**CAPACIDADE DE TAMPONAMENTO DE FÓSFORO EM SOLOS DO ESTADO DO  
PARANÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em  
Agronomia, da Universidade Estadual do Norte do Paraná,  
*Campus* Luiz Meneghel, como requisito parcial para a  
obtenção do título de Mestre em Agronomia.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Oriel Tiago Kölln (Orientador) .....UENP/CCA

Prof. Dr. Tales Tiecher (Titular) .....UFRGS/CCA

Prof. Dr. Francisco Carlos Mainardes da Silva (Titular) .....UENP/CCA

Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Müller (Suplente) ..... UNICENTRO/CCA

Prof. Dr. Diego Resende Rodrigues (Suplente) .....UENP/CCB

---

Prof. Dr. Oriel Tiago Kölln

Orientador

Universidade Estadual do Norte do Paraná

*Campus* Luiz Meneghel

**BANDEIRANTES-PR**

**2026**

**Ofereço** este trabalho a **Deus**,  
fonte de força e sabedoria, e à  
minha **família**, pelo apoio  
incondicional.

**Dedico** este trabalho à memória de minha prima,  
**Elinah Narumi Inoue**, que partiu cedo demais.  
Sua dedicação à pesquisa, seu cuidado com o  
próximo e a forma generosa e intensa com que viveu  
permanecem como inspiração permanente em nossa  
caminhada. Ela vive em nós, naquilo que cultivamos,  
amamos e compartilhamos todos os dias. Com eterno  
carinho, à nossa estrela no céu, que segue iluminando  
nossos caminhos.

## **AGRADECIMENTOS**

A Jesus Cristo, pela vida, pela graça e pela capacitação concedida ao longo desta jornada, sustentando-me nos momentos de dificuldade e permitindo a concretização deste trabalho.

À minha família, em especial a Afonso K. Inoue, Lucinda M. Mouro Inoue, Marina S. Inoue, Elizete E. Hashimoto da Silva, Eli P. da Silva, Matheus H. da Silva e Érika J. Inoue, pelo apoio constante e compreensão nos períodos de ausência.

À minha companheira para todas as horas, Margarete de Oliveira Oles, pelo incentivo, carinho e compreensão nos períodos de ausência.

Aos grandes amigos, Anderson B. da Silva, Paulo G. R. de O. Ferreira, Humberto T. Shimada, Fernando A. Mossato, Eduardo A. da Costa e Pedro H. Mendes pela amizade, incentivo e companheirismo ao longo dessa caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Oriel Tiago Kölln, pela orientação segura, confiança, paciência e pelas valiosas contribuições científicas, fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos membros da banca de qualificação e defesa, Prof. Dr. Tales Tiecher, Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Müller, Prof. Dr. Francisco Carlos Mainardes da Silva e Prof. Dr. Diego Resende Rodrigues, pelas sugestões pertinentes e pelo tempo dedicado à avaliação desta dissertação.

À técnica do Laboratório de Solos, Esmeralda A. S. Garcia, pelo apoio, ensinamentos e incentivo ao longo das atividades laboratoriais.

À Prof.<sup>a</sup> Dra. Laila Herta Mihsfeldt, pelo espaço cedido, pelo apoio e incentivo, fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia pelo apoio e ensinamentos, bem como à CAPES pelo apoio financeiro

Ao Laboratório de Microbiologia do Solo – Lab MicroS, sob a coordenação do Prof. Dr. Leopoldo Sussumo Matsumoto, pelo empréstimo de equipamentos e pelo apoio prestado durante a execução deste trabalho.

Por fim, a todos que, de alguma forma, ofereceram apoio e incentivo ao longo desta jornada.

"O princípio é este: em tudo que é digno de ter – mesmo em todos os prazeres – há uma porção de dor ou tédio que deve ser preservada a fim de que o prazer possa renascer e perdurar.

A alegria da batalha vem depois do primeiro medo da morte; a alegria de ler Virgílio vem depois do enfado de tê-lo estudado; o entusiasmo do banhista vem depois do choque inicial em face da gelada água do mar; e o sucesso do matrimônio vem depois do fracasso da lua de mel." G. K. Chesterton.

INOUE, M.Y. **Capacidade de tamponamento de fósforo em solos do estado do Paraná.** 2026. Dissertação de Mestrado em Agronomia - Universidade Estadual do Norte do Paraná, Campus Luiz Meneghel, Bandeirantes, 2026.

## RESUMO

A saturação parcial dos sítios de sorção de fósforo (P) por meio da adubação corretiva fosfatada constitui estratégia fundamental para melhorar a eficiência de utilização do nutriente em solos tropicais e subtropicais. O estado do Paraná ainda não dispõe de um método formalizado e explícito para a recomendação da adubação corretiva. Nesse contexto, o objetivo deste ensaio foi quantificar a capacidade de tamponamento de fósforo (CTP) de solos paranaenses, adotando-a como parâmetro-base para recomendação de doses corretivas, bem como desenvolver modelos preditivos baseados no teor de argila e/ou fósforo remanescente (Prem). O experimento foi conduzido nas dependências do laboratório de solos da Universidade Estadual do Norte Paraná (UENP/CLM). Foram coletadas 26 amostras de solo distribuídas no estado Paraná, na profundidade de 0-20 cm. Quando necessário, a correção do pH foi realizada por meio da incubação com cal hidratada, com pH alvo de 5,5 em  $\text{CaCl}_2$ . As amostras foram caracterizadas e incubadas por 20 dias com 12 doses de P distintas, determinadas a partir da capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), em 3 repetições. A fonte de P utilizada foi o superfosfato triplo. Ao final do período de incubação, os teores de P foram determinados por extração com Mehlich-1 e quantificados pelo método colorimétrico. Modelos matemáticos foram ajustados por regressões segmentadas. A capacidade de tamponamento de P (CTP) foi então determinada pelo inverso dos coeficientes angulares das retas ajustadas. As quantidades necessárias para elevar os teores de P no solo em  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  variaram de  $2,557 \text{ kg de P ha}^{-1}$  a  $58,824 \text{ kg de P ha}^{-1}$ . A análise exploratória dos dados permitiu agrupar os valores estimados de CTP em classes de acordo com o teor de argila, organizadas em tabela com finalidade prática de interpretação e recomendação. Os valores médios variaram de  $3,94 \text{ kg de P ha}^{-1}$  em solos com menos de  $250 \text{ g kg}^{-1}$  de argila até  $25,89 \text{ kg de P ha}^{-1}$  em solos com mais de  $400 \text{ g kg}^{-1}$  de argila. Considerando solos com disponibilidade inicial de P classificada como “muito baixa”, as doses necessárias para atingir níveis considerados suficientes variaram aproximadamente de  $135$  a  $450 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ , conforme o teor de argila, indicando que as recomendações atualmente utilizadas podem subestimar a demanda de solos mais argilosos. Em adição, foram gerados modelos de predição incluindo o teor de argila e o Prem como preditores únicos e, de forma complementar, um modelo de regressão múltipla incluindo ambos os preditores. A inclusão do Prem no modelo de predição aumentou a capacidade explicativa do modelo. A CTP aumentou significativamente com o teor de argila. A tabela de estimativa da CTP mostrou-se consistente para recomendação prática, embora os modelos de predição tenham apresentado maior sensibilidade em solos com teor de argila entre  $400$  a  $550 \text{ g kg}^{-1}$ . Para o estado do Paraná, onde ainda não há um método formalmente estabelecido para recomendação de adubação corretiva fosfatada, a capacidade de tamponamento de fósforo (CTP) apresenta potencial como ferramenta técnica para subsidiar a definição de doses de correção.

**Palavras-chave:** fixação de P, retenção de P, disponibilidade de P, P lábil, P não lábil.

INOUE, M.Y. **Phosphorus Buffering Capacity in Soils of the State of Paraná.** 2026. Dissertação de Mestrado em Agronomia - Universidade Estadual do Norte do Paraná, Campus Luiz Meneghel, Bandeirantes, 2026.

### ABSTRACT

Phosphorus (P) partial saturation of sorption sites through corrective phosphate fertilization represents a key strategy for improving nutrient use efficiency in tropical and subtropical soils. The state of Paraná does not yet have a formalized and explicit method for recommending corrective fertilization. In this context, the objective of this study was to quantify the phosphorus buffering capacity (PBC) of soils from Paraná, adopting it as a baseline parameter for the recommendation of corrective P rates, as well as to develop predictive models based on clay content and/or remaining phosphorus (Prem). The experiment was conducted at the Soil Laboratory of the State University of Northern Paraná (UENP/CLM). Twenty-six soil samples were collected across the state of Paraná at a depth of 0–20 cm. When necessary, pH correction was performed through incubation with hydrated lime, targeting a pH of 5.5 in CaCl<sub>2</sub>. The samples were characterized and incubated for 20 days with 12 different P rates, determined based on the maximum phosphorus adsorption capacity (MPAC), in three replicates. Triple superphosphate was used as the phosphorus source. At the end of the incubation period, soil P contents were determined by Mehlich-1 extraction and quantified using the colorimetric method. Mathematical models were fitted using segmented regression. Phosphorus buffering capacity (PBC) was then determined as the inverse of the slope coefficients of the fitted linear segments. The amounts required to increase soil P concentration by 1 mg dm<sup>-3</sup> ranged from 2.557 to 58.824 kg P ha<sup>-1</sup>. Exploratory data analysis enabled the grouping of estimated PBC values into classes according to clay content, organized into a practical interpretation and recommendation table. Mean values ranged from 3.94 kg P ha<sup>-1</sup> in soils with less than 250 g kg<sup>-1</sup> of clay to 25.89 kg P ha<sup>-1</sup> in soils with more than 400 g kg<sup>-1</sup> of clay. Considering soils with initial P availability classified as “very low,” the required doses to reach sufficiency levels ranged approximately from 135 to 450 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, depending on clay content, indicating that current recommendations may underestimate P requirements in highly clayey soils. Additionally, predictive models were developed using clay content and Prem as single predictors, as well as a multiple regression model incorporating both variables. The inclusion of Prem improved the explanatory power of the model. PBC increased significantly with increasing clay content. The PBC estimation table proved consistent for practical recommendation purposes, although the predictive models showed greater sensitivity in soils with clay contents between 400 and 550 g kg<sup>-1</sup>. For the state of Paraná, where no formally established method for corrective phosphate fertilization currently exists, phosphorus buffering capacity (PBC) shows potential as a technical tool to support the definition of corrective P application rates.

**Keywords:** phosphorus fixation; phosphorus retention; phosphorus availability; labile P; non-labile P.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1. DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS COLETADOS EM MUNICÍPIOS PARANAENSES. BASE CARTOGRÁFICA: INSTITUTO ÁGUA E TERRA – IAT.....                          | 25 |
| FIGURA 2. DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS COLETADOS EM UNIDADES DE MAPEAMENTO PEDOLÓGICO NO ESTADO DO PARANÁ. BASE CARTOGRÁFICA: BHERING ET AL. (2008). .... | 26 |
| FIGURA 3. PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA CMR. SATURAÇÃO POR CAPILARIDADE(A), DRENAGEM DO EXCESSO DE ÁGUA POR GRAVIDADE (B). ....                  | 28 |
| FIGURA 4. SOLOS INCUBADOS COM 0%, 70%, 100% E 130% DA NECESSIDADE DE CALAGEM. ....                                                                   | 29 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| GRÁFICO 1. AJUSTE DE REGRESSÕES LINEARES SEGMENTADAS ENTRE OS TEORES DE P RECUPERADOS POR MEHLICH-1 E AS DOSES DE P ADICIONADAS, APÓS 20 DIAS DE INCUBAÇÃO, EM SOLOS COLETADOS NO ESTADO DO PARANÁ. ....                                                                                                                                                                                                 | 44 |
| GRÁFICO 2. REMODELAGEM DAS RELAÇÕES DOSE–RESPOSTA POR REGRESSÕES LINEARES SIMPLES ENTRE OS TEORES DE P RECUPERADOS POR MEHLICH-1 E AS DOSES DE P ADICIONADAS, APÓS 20 DIAS DE INCUBAÇÃO, EM SOLOS DO PARANÁ. ....                                                                                                                                                                                        | 44 |
| GRÁFICO 3. MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE SPEARMAN DAS PROPRIEDADES DOS SOLOS NA CAMADA 0-20CM EM SOLOS DE MATA, COLETADOS NO ESTADO DO PARANÁ. ....                                                                                                                                                                                                                                                            | 46 |
| GRÁFICO 4. AGRUPAMENTO DOS VALORES DE CMAP E FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DOS SOLOS COLETADOS NO ESTADO DO PARANÁ, DE ACORDO COM A CLASSIFICAÇÃO PROPOSTA POR JUO E FOX (1977). ....                                                                                                                                                                                                                         | 47 |
| GRÁFICO 5. AGRUPAMENTO DOS VALORES DE CAPACIDADE DE TAMPONAMENTO DE FÓSFORO (CTP-1) DE ACORDO COM AS CLASSES DE ARGILA, DETERMINADAS CONFORME A SBCS/NEPAR (2019), E FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA. ....                                                                                                                                                                                                      | 48 |
| GRÁFICO 6. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS E CORRELAÇÃO DE PEARSON. PONTOS MARCADOS EM VERMELHO FORAM TOMADOS COMO OUTLIERS. ....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 49 |
| GRÁFICO 7. MODELOS MATEMÁTICOS PARA A PREDIÇÃO DA CTP-1 EM FUNÇÃO DO TEOR DE ARGILA. PONTOS MARCADOS EM VERMELHO FORAM TOMADOS COMO OUTLIERS. ....                                                                                                                                                                                                                                                       | 50 |
| GRÁFICO 8. MODELOS MATEMÁTICOS PARA A PREDIÇÃO DA CTP-1 EM FUNÇÃO DO P REMANESCENTE. PONTOS MARCADOS EM VERMELHO FORAM TOMADOS COMO OUTLIERS. ....                                                                                                                                                                                                                                                       | 51 |
| GRÁFICO 9. MODELO MATEMÁTICO PARA A PREDIÇÃO DA CTP-1 EM FUNÇÃO DO TEOR DE ARGILA E DO FÓSFORO REMANESCENTE (PREM), COM PROJEÇÃO BIDIMENSIONAL DO PLANO DE RESPOSTA. ....                                                                                                                                                                                                                                | 51 |
| GRÁFICO 10. COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DAS CAPACIDADES DE TAMPONAMENTO DE P DO NEPAR/SBCS (2019), DETERMINADAS CONFORME DUARTE ET AL. (2026), E AS ESTIMADAS POR MEIO DO AGRUPAMENTO DENTRO DAS CLASSES DE ARGILA, EM KG DE $P_2O_5\ HA^{-1}$ (ESQUERDA). CAPACIDADE DE TAMPONAMENTO DE P PROPOSTA POR SOUSA, LOBATO E REIN (2006) PARA A REGIÃO DO CERRADO, EM KG DE $P_2O_5\ HA^{-1}$ (DIREITA). .... | 53 |
| GRÁFICO 11. COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES ESTIMADOS A PARTIR DO AGRUPAMENTO DAS DOSES DE $P_2O_5$ DENTRO DAS CLASSES DE DISPONIBILIDADE DE P, E AS DOSES DE FÓSFORO RECOMENDADAS PARA A CULTURA DA SOJA, CONSIDERANDO UMA EXPECTATIVA DE PRODUTIVIDADE DE $4\ T\ HA^{-1}$ , CONFORME A SBCS/NEPAR (2019). ....                                                                                             | 55 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1. IDENTIFICAÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E COORDENADAS GEOGRÁFICAS DOS PONTOS DE COLETA DE SOLO NO ESTADO DO PARANÁ. ....                                                                            | 24 |
| TABELA 2. TEORES DE AREIA, SILTE E ARGILA DETERMINADOS PELO MÉTODO DO DENSÍMETRO, DE SOLOS COLETADOS NUMA CAMADA DE 0-20CM, LOCALIZADOS NO ESTADO DO PARANÁ.....                                   | 27 |
| TABELA 3. CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS SOLOS COLETADOS NO ESTADO DO PARANÁ, NA PROFUNDIDADE 0-20CM, E DETERMINAÇÃO DA NECESSIDADE DE CALAGEM PARA AJUSTE DO PH A 5,5 EM $\text{CaCl}_2$ . ....       | 31 |
| TABELA 4. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS COLETADAS NO ESTADO DO PARANÁ, NA PROFUNDIDADE 0-20 CM, APÓS A CORREÇÃO DE PH POR MEIO DA INCUBAÇÃO COM CAL HIDRATADA.                               | 35 |
| TABELA 5. AGRUPAMENTO DOS SOLOS EM FUNÇÃO DA CMAP E DOSES P UTILIZADAS NA INCUBAÇÃO DE SOLOS COLETADOS NO ESTADO DO PARANÁ. ....                                                                   | 37 |
| TABELA 6. ANÁLISE EXPLORATÓRIA: VARIABILIDADE DA CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM CLASSES DE CAPACIDADE DE ADSORÇÃO. ....                                                               | 47 |
| TABELA 7. ANÁLISE EXPLORATÓRIA: VARIABILIDADE DA CAPACIDADE DE TAMPONAMENTO DE FÓSFORO EM FUNÇÃO DAS CLASSES DE TEOR DE ARGILA. ....                                                               | 48 |
| TABELA 8. VALORES DE CTP-1 EM FUNÇÃO DAS CLASSES DE ARGILA PARA A RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO FOSFATADA CORRETIVA OBTIDA PELO AGRUPAMENTO DOS VALORES OBSERVADOS.....                                 | 52 |
| TABELA 9. VALORES DE CTP-1 EM FUNÇÃO DAS CLASSES DE ARGILA PARA A RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO FOSFATADA CORRETIVA OBTIDA POR MEIO DO MODELO EXPONENCIAL AJUSTADO EM FUNÇÃO DO TEOR DE ARGILA. ....    | 52 |
| TABELA 10. VALORES DE CTP-1 EM FUNÇÃO DAS CLASSES DE P REMANESCENTE PARA A RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO FOSFATADA CORRETIVA OBTIDA POR MEIO DO MODELO LINEAR AJUSTADO EM FUNÇÃO DO P REMANESCENTE..... | 53 |
| TABELA 11. DOSES DE $\text{P}_2\text{O}_5$ PARA A ADUBAÇÃO FOSFATADA CORRETIVA TOTAL EM FUNÇÃO DOS TEORES DE ARGILA. ....                                                                          | 54 |

## SUMÁRIO

|                                                                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                   | <b>15</b> |
| <b>2 JUSTIFICATIVA:.....</b>                                                                                                | <b>16</b> |
| <b>3 OBJETIVOS: .....</b>                                                                                                   | <b>16</b> |
| <b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                                                                        | <b>17</b> |
| 4.1 FORMAS DE FÓSFORO NO SOLO .....                                                                                         | 17        |
| 4.2 MECANISMOS DE RETENÇÃO DE FÓSFORO .....                                                                                 | 18        |
| 4.3 VARIÁVEIS QUE CONDICIONAM A DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO .....                                                    | 20        |
| 4.4 MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA COM FOCO NO ESTADO DO PARANÁ.....                                                          | 21        |
| <b>5 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                                                                                            | <b>24</b> |
| 5.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO EXPERIMENTO .....                                                                               | 24        |
| 5.2 COLETA DOS SOLOS E PREPARO INICIAL DAS AMOSTRAS .....                                                                   | 24        |
| 5.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....                                                                                             | 26        |
| 5.4 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE MÁXIMA DE RETENÇÃO DE ÁGUA.....                                                              | 28        |
| 5.5 CORREÇÃO DO pH DOS SOLOS .....                                                                                          | 28        |
| 5.5.1 <i>Determinação do pH, do índice SMP e da acidez total iniciais</i> .....                                             | 28        |
| 5.5.2 <i>Ajustes das doses de calcário</i> .....                                                                            | 29        |
| 5.6 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS APÓS A CORREÇÃO DA ACIDEZ.....                                                         | 32        |
| 5.6.1 <i>Determinação do carbono orgânico total</i> .....                                                                   | 32        |
| 5.6.2 <i>Determinação de cálcio e magnésio trocáveis</i> .....                                                              | 32        |
| 5.6.3 <i>Determinação dos teores de P e K</i> .....                                                                         | 32        |
| 5.6.4 <i>Determinação do fósforo remanescente</i> .....                                                                     | 33        |
| 5.6.5 <i>Determinação da capacidade máxima de adsorção de fósforo</i> .....                                                 | 33        |
| 5.7 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE TAMPONAMENTO DE FÓSFORO EM SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ.....                                 | 36        |
| 5.7.1 <i>Inclinações do primeiro segmento das regressões segmentadas</i> .....                                              | 38        |
| 5.7.2 <i>Seleção dos parâmetros para compor o modelo de predição da capacidade de tamponamento de P</i> .....               | 38        |
| 5.8 QUANTIFICAÇÃO DAS DOSES DE P PARA ADUBAÇÃO FOSFATADA DE CORREÇÃO COM BASE NA CAPACIDADE DE TAMPONAMENTO DOS SOLOS ..... | 39        |

|                                                                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.9 CONSTRUÇÃO DE TABELAS PARA DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE TAMPONAMENTO E SIMULAÇÃO DE DOSES DE ADUBAÇÃO FOSFATADA CORRETIVA TOTAL ..... | 39        |
| 5.10 ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE TAMPONAMENTO DE FÓSFORO DO MANUAL DE ADUBAÇÃO E CALAGEM PARA O ESTADO DO PARANÁ .....                     | 40        |
| <b>6 RESULTADOS.....</b>                                                                                                                   | <b>40</b> |
| 6.1 CAPACIDADES DE TAMPONAMENTO DE P: VISUALIZAÇÃO GERAL DAS REGRESSÕES SEGMENTADAS E REGRESSÕES LINEARES SIMPLES.....                     | 40        |
| 6.2 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO .....                                                                                                            | 44        |
| 6.3 ANÁLISE EXPLORATÓRIA: AGRUPAMENTO DAS CAPACIDADES DE TAMPONAMENTO DE FÓSFORO E CAPACIDADES MÁXIMAS DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO .....        | 46        |
| 6.4 SELEÇÃO DE PREDITORES PARA ESTIMATIVA DA CAPACIDADE TAMPONAMENTO DE FÓSFORO.....                                                       | 48        |
| 6.5 MODELOS MATEMÁTICOS PARA PREDIÇÃO DA CAPACIDADE DE TAMPONAMENTO DE FÓSFORO.....                                                        | 49        |
| 6.6 TABELAS DE PARA DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE TAMPONAMENTO EM FUNÇÃO DO TEOR DE ARGILA                                                 | 51        |
| 6.7 TABELAS DE PARA DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE TAMPONAMENTO EM FUNÇÃO DO FÓSFORO REMANESCENTE.....                                      | 53        |
| 6.8 AJUSTES NAS DOSES DE ADUBAÇÃO CORRETIVA TOTAL PARA SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ.....                                                      | 54        |
| <b>7 DISCUSSÃO .....</b>                                                                                                                   | <b>56</b> |
| 7.1 CAPACIDADE DE TAMPONAMENTO DE FÓSFORO E PARÂMETROS RELACIONADOS .....                                                                  | 56        |
| 7.2 ADUBAÇÃO CORRETIVA FOSFATADA COM BASE NA CAPACIDADE DE TAMPONAMENTO DE FÓSFORO.....                                                    | 59        |
| <b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                                                                                                         | <b>61</b> |
| <b>9 CONCLUSÕES.....</b>                                                                                                                   | <b>62</b> |
| <b>REFERÊNCIAS: .....</b>                                                                                                                  | <b>64</b> |
| <b>APÊNDICES .....</b>                                                                                                                     | <b>72</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A essencialidade do fósforo (P) para o desenvolvimento e a sustentabilidade produtiva das culturas agrícolas decorre de sua atuação no metabolismo energético celular, além de integrar moléculas estruturais e funcionais indispensáveis ao crescimento vegetal (Vance, Uhde-Stone e Allan, 2003; Taiz e Zeiger, 2006).

Apesar de sua baixa concentração relativa nas plantas (Schactman, Reid e Ayling, 1998), o P apresenta elevada afinidade com os minerais de argila, tornando-se frequentemente um dos principais nutrientes limitantes à produção agrícola (Quaggio; Mattos; Raij, 2022). Quando aplicado e não removido pelas culturas, tende a acumular - se no solo ao longo do tempo, passando a compor frações moderadamente lábeis e não lábeis, o que reduz sua disponibilidade imediata para as plantas (Gatiboni *et al.*, 2008; Rodrigues *et al.*, 2016; Withers *et al.*, 2018). Essa limitação é especialmente relevante em solos com alto grau de intemperização, em que a elevada capacidade de retenção (Novais e Smyth, 1999; Rheinheimer *et al.*, 2008, Pavinato *et al.*, 2020), associada principalmente à presença de óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) (Novais e Smyth, 1999), está diretamente associada à baixa eficiência de uso do P (Roy *et al.*, 2016).

A capacidade de dreno de P do solo, na maioria dos casos, é substancialmente superior ao dreno promovido pelas plantas (Novais, Smyth e Nunes, 2007), podendo adsorver quantidades superiores a 4.000 kg ha<sup>-1</sup> de P (Guilherme *et al.*, 2000; Oliveira *et al.*, 2014; Campos, Antonangelo e Alleoni, 2016; Rogeri *et al.*, 2016; Mumbach *et al.*, 2020). Em contraste, culturas anuais como a soja, extraem em toda a sua biomassa em torno de 25 kg ha<sup>-1</sup> de P (SBCS/NEPAR, 2019).

A elevada capacidade dreno de P de solos tropicais exige técnicas de manejo adequadas para aumentar o aproveitamento da adubação fosfatada. Quando os teores do nutriente se encontram abaixo do nível crítico (N<sub>c</sub>), a adubação corretiva torna-se necessária (CQFS – RS/SC, 2016; Sousa *et al.*, 2016) e fundamental na promoção de rendimentos satisfatórios desde as fases iniciais de implantação (Oliveira *et al.*, 2020; Gotz *et al.*, 2023).

Solos que inicialmente apresentam baixos níveis de P disponível, mas que, ao longo do tempo, receberam adubações suficientes para elevar sua disponibilidade, tendem a requerer doses progressivamente menores para suprir a demanda das plantas (Roy *et al.*, 2017; Barrow e Debnath, 2018). A redução da capacidade de retenção é sustentada pela hipótese de diminuição dos sítios de sorção de P de maior afinidade à medida que são saturados pelo P proveniente da fertilização (Barrow e Debnath, 2014).

A correção dos níveis de P por meio da adubação corretiva fosfatada constitui uma estratégia basilar de manejo para aumentar a eficiência de utilização desse nutriente, devendo, portanto, preceder outras práticas voltadas à melhoria de seu aproveitamento. No estado do Paraná, ainda não há um método explicitamente definido para o cálculo das doses de adubação corretiva fosfatada, evidenciando a necessidade de critérios técnicos mais claros que orientem essa prática.

## **2 JUSTIFICATIVA:**

O estado do Paraná ainda não dispõe de um método oficial explícito de recomendação de correção de fósforo. A calibração do método de recomendação baseado na capacidade de tamponamento de P surge como uma abordagem complementar, fornecendo um parâmetro adicional para definição de doses, contribuindo para o planejamento operacional e financeiro de práticas corretivas.

## **3 OBJETIVOS:**

Validação do método por meio da modelagem matemática e análise de agrupamento, considerando os parâmetros mais sensíveis relacionados a capacidade de tamponamento de P em solos do Paraná.

Quantificação das doses de P necessárias para a adubação de correção de P em solos do estado Paraná, fundamentada explicitamente na capacidade de tamponamento de P.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Formas de fósforo no solo

A categorização das formas de P no solo, sob a perspectiva prática, é determinada essencialmente pelos extratores empregados em sua quantificação (Rheinheimer *et al.*, 2008). No método clássico de fracionamento de Chang e Jackson (1957), as formas químicas inorgânicas de P podem ser agrupadas em termos de sua solubilidade, distribuindo-se em ordem decrescente: fosfatos ligados ao cálcio (P-Ca), seguidos pelos fosfatos ligados ao alumínio (P-Al) e os fosfatos ligados ao ferro (P-Fe). Como alternativa, o método de fracionamento sequencial de Hedley *et al.* (1983) não faz uma distinção das espécies químicas de P, mas propõe uma classificação baseada na labilidade do fósforo no solo, determinada a partir das forças de extração dos reagentes utilizados.

Contudo, nem todas as formas podem ser quantificadas com a precisão desejada, uma vez que não existem limites claramente definidos entre elas. Essa limitação decorre de sua distribuição ao longo de uma ampla faixa de forças de retenção, associadas a diferentes grupos funcionais (Rheinheimer *et al.*, 2008). O problema dos métodos de fracionamento de P no solo não se limita à imprecisão da identificação das espécies químicas, mas também envolve a interpretação literal dos resultados, como se as diferentes formas de P estivessem rigidamente compartimentalizadas em frações fixas (Barrow *et al.*, 2020). Embora apresentem limitações analíticas (Codron e Newman, 2011; Barrow *et al.*, 2020), os métodos de fracionamento são úteis para interpretar e investigar as frações de P quanto à sua capacidade de suprir a demanda das plantas (Rodrigues *et al.*, 2021; Gotz *et al.*, 2025).

Na tentativa de compreender a dinâmica do P no solo, é comum o uso de classificações mais generalistas, dividindo o elemento em dois grandes grupos: o fósforo inorgânico (Pi) e o fósforo orgânico (Po), conforme a natureza dos compostos aos quais está associado. No grupo do Pi, distingue-se frequentemente entre o P presente em minerais primários, como a apatita, e o P associado às partículas de carga variável do solo, principalmente em óxidos e hidróxidos de Fe e Al e a caulinita (Rheinheimer *et al.*, 2008).

O Po do solo tem como principais fontes os resíduos vegetais adicionados ao solo, os tecidos microbianos vivos ou mortos, bem como os produtos resultantes de sua decomposição (Conte *et al.*, 2002; Martinazzo *et al.*, 2007). Mais da metade do Po extraível do solo encontra-se na forma de monoésteres de fosfato, com os fosfatos de inositol como compostos

predominantes. Do restante, estima-se que aproximadamente 5% seja constituído por fosfolipídios, enquanto cerca de 2% correspondem a ácidos nucleicos (Magid *et al.*, 1996).

Do ponto de vista da fertilidade do solo, o P é classificado com base na sua capacidade de reabastecer a solução do solo. Independentemente de sua natureza química, pode ser compartimentalizado em três formas: P lábil, P moderadamente lábil e P não lábil (Rheinheimer *et al.*, 2008). A fração lábil, tanto nas formas orgânica quanto inorgânica, apresenta fraca ligação com a matriz do solo e desempenha papel essencial como tamponante da solução do solo (Rheinheimer *et al.*, 2008; Gatiboni *et al.*, 2017; Nunes *et al.*, 2020).

Embora as variadas formas de P encontradas no solo possam, em maior ou menor grau, contribuir para a nutrição das plantas, estas absorvem exclusivamente as formas disponíveis na solução do solo, na forma de ânions de ortofosfato monovalentes ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) ou bivalentes ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) (Novais e Smyth, 1999; Havlin *et al.*, 2013), sendo necessário, portanto, a liberação dessas formas por mecanismos específicos a partir das reservas do solo.

## 4.2 Mecanismos de retenção de fósforo

A principal fonte natural de P dos solos está associada à estrutura dos minerais primários, principalmente a apatita (Walker e Syers, 1979; Sanchez, 2022). Entretanto, em solos com maior grau de intemperização, como os solos predominantemente encontrados no estado Paraná (Bhering *et al.*, 2007), a maior parte das fontes primárias já sofreu intensas transformações ao longo do tempo, resultando em reduções significativas do P total no solo (Porder e Hilley, 2011).

À medida que as forças responsáveis pelo intemperismo atuam sobre o solo, ocorre gradualmente uma alteração no balanço de cargas, tornando-o mais eletropositivo em detrimento de sua perda da capacidade de troca de cátions efetiva (CTC efetiva), aumentando a adsorção aniônica (Novais; Smyth; Nunes, 2007). A mudança no perfil de carga está relacionada, principalmente, ao aumento da participação de minerais secundários do tipo 1:1, como a caulinita, além de óxidos e hidróxidos Fe e Al (Lepsch, 2011; Bortoluzzi *et al.*, 2015).

A natureza do mecanismo de adsorção de P vai além da atração eletrostática (Novais e Smyth, 1999). Mesmo com sinal de carga superficial desfavorável, a adsorção de P ainda ocorre, indicando a existência de mecanismos mais específicos envolvidos (Goldberg e Sposito, 1985). Durante a fase inicial de rápida adsorção de P pelo solo, o nutriente é primeiramente atraído por interações eletrostáticas e, em seguida, ocorre uma adsorção específica pelos óxidos e hidróxidos de Fe e Al (Parfitt, 1978; Barrow, 1985; Sanyal & De Datta, 1991), formando ligações altamente estáveis (Parfitt, 1978).

A adsorção específica do fosfato aos óxidos e hidróxidos de Fe e Al é favorecida em formas de baixa cristalinidade, com superfícies apresentando elevado desbalanço de cargas, facilitando a formação de sítios reativos (Reinheimer *et al.*, 2008). Esses sítios atuam como ácidos de Lewis e se originam da protonação de grupos hidroxila superficiais coordenados a centros metálicos eletropositivos. A facilidade da protonação é determinada pelas valências de ligação insatisfeitas e pelo número de ligações do OH ao metal, conferindo diferentes níveis de reatividade (Sposito, 2008).

Como resultado, a protonação dos grupos hidroxila dá início a dois processos distintos na adsorção de fosfato: (a) superfícies protonadas criam um campo elétrico positivo que atrai os íons fosfato; e (b) o fosfato substitui os grupos hidroxila protonados (Fink *et al.*, 2016b). O fosfato pode se ligar à superfície metálica de diferentes maneiras: monodentada, quando apenas um oxigênio do fosfato se conecta ao metal; bidentada, quando dois oxigênios estão ligados ao mesmo átomo metálico; e binucleada, quando dois oxigênios do fosfato se ligam a dois átomos metálicos distintos (Goldberg e Sposito, 1985).

Com o passar do tempo, o P inicialmente adsorvido especificamente às superfícies externas das partículas de solo tende a difundir-se para o interior dessas estruturas (Haynes, 1984). Trata-se de um processo gradual, que pode levar anos até alcançar o equilíbrio, e que também contribui para a redução da disponibilidade de P em solos recentemente adubados, à medida que aumenta o tempo de contato com o solo (Barrow, 1985). O “envelhecimento” do P ligado ao solo resulta em maior estabilidade e maior dificuldade de dessorção (Novais e Smyth, 1999; Reinheimer *et al.*, 2008).

Essa reação adicional de difusão-penetração leva a uma dificuldade para a escolha da terminologia adequada para descrever o processo (Novais e Smyth, 1999). Segundo Barrow (1985), os termos mais apropriados para representar esse processo, que engloba tanto a adsorção específica superficial quanto a difusão-penetração do íon fosfato nas partículas do solo, seriam “sorção” ou “retenção”.

Cumpre destaque que a precipitação de P no solo assume papel relevante especialmente durante a dissolução dos grânulos de fertilizantes fosfatados, quando são excedidos os limites de solubilidade dos compostos formados na reação solo-fertilizante. A natureza do composto que precipita depende dos tipos e quantidades de cátions e espécies fosfatadas fornecidos tanto pelo fertilizante quanto pelo solo, além do pH e umidade do solo (Sample *et al.*, 1980). Dessa forma, a formação de precipitados tende a prevalecer em regiões do solo onde a concentração de P é elevada, ao passo que a adsorção específica prevalece nas demais regiões, caracterizadas por menores teores desse elemento (Havlin *et al.*, 2013).

### 4.3 Variáveis que condicionam a disponibilidade de fósforo no solo

A adsorção de fosfato no solo é fortemente influenciada pelo pH e pela força iônica da solução (Haynes, 1984). Em geral, a adsorção é máxima em condições ácidas, com pH entre 2 e 4 e diminui gradualmente até pH 7, quando passa a decrescer de forma mais acentuada devido ao aumento da repulsão eletrostática entre as superfícies do solo e os íons fosfato (Bowden *et al.*, 1980).

Em solos intemperizados de regiões tropicais e subtropicais, a presença de óxidos de ferro pedogênicos, como a goethita e a hematita (Fink *et al.*, 2016b), pode aumentar a densidade de sítios de superfície reativos e modificar o ponto de carga zero (PCZ) local, tornando as superfícies mais reativas com íons fosfato. Goldberg, Forster e Godfrey (1996) observaram valores de PCZ abaixo de 3 para a caulinita e valores acima de 7 para as formas óxidicas, de modo que, em solos com pH ligeiramente ácido, o balanço de cargas é marcado pela predominância de cargas positivas nos óxidos.

Curvas de solubilidade de compostos fosfatados precipitados, relacionando a fração solubilizada de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  com o pH, indicam que os fosfatos de Al (variscita) e de Fe (estrengita) apresentam maior estabilidade em meio ácido, aumentando sua solubilidade à medida que o pH se eleva (Olsen & Khasawneh, 1980). Os fosfatos de cálcio (Ca) são menos estáveis em condições ácidas, aumentando sua solubilidade com a diminuição do pH (Olsen & Khasawneh, 1980; Gotz *et al.*, 2025).

A presença de cátions na solução também afeta o processo de adsorção, uma vez que altera a força iônica da solução e promove a neutralização parcial das cargas negativas nos planos de adsorção, reduzindo a repulsão eletrostática e favorecendo a adsorção do fosfato (Ryden e Syers, 1975; Bowden *et al.*, 1980). Adicionalmente, a posição do plano em que ocorre a adsorção de P, segundo o modelo de quatro camadas de Barrow (1985), determina tanto a intensidade do efeito do pH quanto os efeitos da transferência de cargas à superfície.

Além dos efeitos do pH, a textura do solo contribui de forma expressiva na capacidade de sorção de P, especialmente em função da fração argila (Novais e Smyth, 1999). O solo torna-se quimicamente mais reativo à medida que o teor de argila aumenta (Lepsch, 2011), elevando a capacidade de retenção de P, principalmente em razão da maior presença de elementos como o Fe e Al (Fink *et al.*, 2016b; Pavinato *et al.*, 2020). Formas de Fe e Al de baixa cristalinidade apresentam maior reatividade, resultando em maior adsorção de P (Ranno *et al.*, 2007), em decorrência de suas maiores áreas superficiais (Goldberg, Forster e Godfrey, 1996). Solos com predomínio de goethita sobre hematita apresentam maiores capacidades de sorção de P (Parfitt,

1989), indicando o papel relevante da mineralogia da fração argila na retenção desse nutriente (Fink *et al.*, 2016a).

A matéria orgânica do solo (MOS) também desempenha papel relevante na retenção de P, embora seus efeitos sejam mais complexos e, por vezes, ambíguos (Guppy *et al.*, 2005; Fink *et al.*, 2016; Mabagalaa e Mng'ong'o, 2022). Os compostos orgânicos de baixo peso molecular, quando avaliados isoladamente, tendem a exercer efeitos competitivos pelos sítios de adsorção de P apenas na rizosfera, em razão de sua baixa persistência no solo. Entretanto, os compostos liberados durante a decomposição da MOS podem competir de forma mais efetiva pelos sítios de adsorção (Guppy *et al.*, 2005).

Além disso, a matéria orgânica pode alterar a energia de ligação do fósforo adsorvido, possivelmente por meio da formação de complexos de baixa energia mediados por pontes catiônicas (Fink *et al.*, 2016b). Evidências também indicam que extratos vegetais contendo uma variada quantidade de ácidos orgânicos de baixo peso molecular pode exercer papel direto no aumento de frações mais lábeis de P (Pavinato, Merlin e Rosolem, 2008).

Por outro lado, a MOS pode favorecer a retenção de P no solo ao inibir indiretamente a cristalização de Fe e Al, promovendo a formação de formas pedogênicas menos cristalinas, com maior área superficial específica (Bortoluzzi *et al.*, 2015; Mabagalaa e Mng'ong'o, 2022). Adicionalmente, a MOS pode atuar diretamente na retenção de P nos solos. Esse efeito está, em grande medida, associado ao caráter aniônico da MOS que, por meio da formação de pontes de cátions (Sanyal e De Datta, 1991), envolvendo Al, Fe e Ca previamente sorvidos à sua estrutura, passam a atuar como sítios de retenção de P (Novais e Smyth, 1999).

#### **4.4 Manejo da Adubação fosfatada com foco no estado do Paraná**

No contexto do estado do Paraná, o manejo da adubação e da calagem é orientado pelo Núcleo Estadual do Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, por meio do Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná (SBCS/NEPAR, 2019). O teor de P (Mehlich-1) é classificado em 5 níveis de disponibilidade: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, correspondendo a rendimentos relativos de até 40%, 40-70%, 70-90% e 90-100% e teores para os quais não há incrementos de produção significativos ou há limitação de produção.

As culturas de interesse agrícola atingem o máximo retorno econômico quando os teores de P no solo se situam no nível crítico (ou de suficiência), correspondente à transição entre as classes “médio” e “alto”. Nessa condição, o nutriente é considerado adequado e o potencial

produtivo da cultura é de 90% da produção máxima relativa, com reduzida probabilidade de resposta à adubação fosfatada (SBCS/NEPAR, 2019).

O extrator oficial utilizado para a determinação de P no estado do Paraná é o Mehlich-1, baseado no princípio de extração ácida (SBCS/NEPAR, 2019). Em solos com maior capacidade tampão da acidez, especialmente os mais argilosos, o pH do extrator eleva-se rapidamente para valores próximos ao do solo, reduzindo seu poder de extração (Novais e Smyth, 1999). Nesse sentido, teores idênticos de P podem ser enquadrados em distintas classes de disponibilidade, em função da classe de argila a que estão incluídos (SBCS/NEPAR, 2019).

No estado do Paraná, convencionou-se a criação de três classes distintas de argila: solos com teores inferiores a  $250 \text{ g kg}^{-1}$ , solos com teores entre 250 e  $400 \text{ g kg}^{-1}$  e solos com teores superiores a  $400 \text{ g kg}^{-1}$  (SBCS–NEPAR, 2019). Os níveis críticos para a maioria das culturas de interesse agrícola foram estabelecidos em 18, 12 e  $9 \text{ mg dm}^{-3}$ , respectivamente, de acordo com o aumento das classes de argila.

Em solos com fertilidade construída, quando o teor de P encontra-se acima do nível crítico, a adubação de manutenção é recomendada, com finalidade na manutenção do nível do nutriente, procurando-se repor as quantidades perdidas (lixiviação, erosão e fixação) e a quantidade exportada pelas culturas. A dose é estabelecida segundo a expectativa de produtividade da cultura (SBCS/NEPAR, 2019). Por outro lado, Sousa *et al.*, (2016) estabelecem as doses da adubação de manutenção apenas conforme a exportação esperada do nutriente, sob condições de um sistema de semeadura direta e sem limitações de ordem química, física e biológica. Essas divergências na nomenclatura podem dificultar a interpretação e a aplicação das recomendações em diferentes regiões geográficas (Duarte *et al.*, 2026).

Quando o teor de P encontra-se abaixo do nível crítico, a adubação fosfatada corretiva é recomendada, com o objetivo elevar os teores para a faixa “adequada”, correspondendo às doses necessárias para atingir os níveis críticos (Sousa *et al.*, 2016). Nesse caso, as doses aplicadas são superiores às demandadas pelas plantas, visando atender ao forte dreno de P do solo (Novais e Smyth, 1999). Contudo, não há critérios explicitamente definidos para o estabelecimento de doses no estado do Paraná.

A correção pode ser realizada de forma total ou gradual. Na correção total, toda a quantidade necessária de P é aplicada em área total, geralmente antes da implantação do sistema de cultivo, com incorporação à camada arável. Na correção gradual, a dose corretiva é fracionada ao longo das safras e aplicada no sulco de semeadura. Nesse caso, utiliza-se a dose recomendada para solos com teor baixo de P acrescida de uma fração adicional destinada à elevação progressiva dos teores no solo (SBCS/NEPAR, 2019). Em contraste, Sousa *et al.*

(2016) propõem metodologia distinta para a correção gradual de P, em que a dose corretiva é acrescida à adubação anual de manutenção da cultura, de modo que cada aplicação contemple simultaneamente a reposição do P exportado e a elevação gradual dos teores no solo.

A aplicação de doses superiores a  $100 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ , seguida de incorporação, favorece o contato do fertilizante com uma maior porção do sistema radicular, uma vez que o nutriente passa a estar distribuído por toda a camada superficial do solo. Essa condição amplia a absorção de P pelas plantas e tende a resultar em maiores produtividades. Em contraste, a aplicação de doses elevadas no sulco de plantio restringe o acesso ao fertilizante a uma pequena fração das raízes, limitando sua eficiência (Sousa *et al.*, 2016).

Por outro lado, em doses inferiores a  $100 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ , a aplicação de fontes solúveis de P em sulco de semeadura apresenta desempenho semelhante ou até superior à aplicação a lanço e incorporada. Entretanto, a eficiência da adubação fosfatada não depende exclusivamente da quantidade aplicada e da forma de aplicação, devendo-se considerar também a correção da acidez em superfície e subsuperfície; limitações de ordem física, a escolha das fontes de fertilizantes, com atenção à solubilidade, granulometria; a adoção de sistemas que favoreçam o uso eficiente do P, como o sistema de semeadura direta com rotação adequada de culturas (Sousa *et al.*, 2016).

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Caracterização geral do experimento

O ensaio foi conduzido em condições controladas e incluiu a coleta de solos provenientes de diferentes regiões edafoclimáticas do estado do Paraná. Quando necessário ( $\text{pH}_{\text{inicial}}$  inferior a 5,1 em  $\text{CaCl}_2$ ), o pH das amostras foi ajustado por meio da incubação com cal hidratada. Posteriormente, os solos foram incubados com diferentes concentrações de P, definidas a partir de suas capacidades máximas de adsorção de fósforo (CMAP). A Capacidade de Tamponamento de Fósforo (CTP) foi então determinada a partir do inverso da relação entre as doses de P aplicadas e as quantidades recuperadas pelo extrator Mehlich-1.

### 5.2 Coleta dos solos e preparo inicial das amostras

Foram coletadas 26 amostras de solo, com o objetivo de representar uma ampla variabilidade de características físico-químicas (Figura 1). As coletas foram realizadas em áreas de mata adjacentes a áreas cultivadas, na profundidade de 0 a 20 cm, e distribuídas nos três planaltos paranaenses (Apêndice 3). Após as coletas, as amostras foram secas ao ar, destorroadas manualmente e passadas em peneiras de malha 2mm de abertura.

A identificação das classes de solo não foi realizada *in loco* nem por meio de descrição morfológica detalhada, sendo, portanto, de caráter indicativo e não preciso. Essa identificação foi realizada a posteriori, com base na posição aproximada dos pontos amostrais plotados sobre o mapa pedológico, permitindo apenas uma classificação estimada das classes de solo associadas às áreas de coleta (Figura 2).

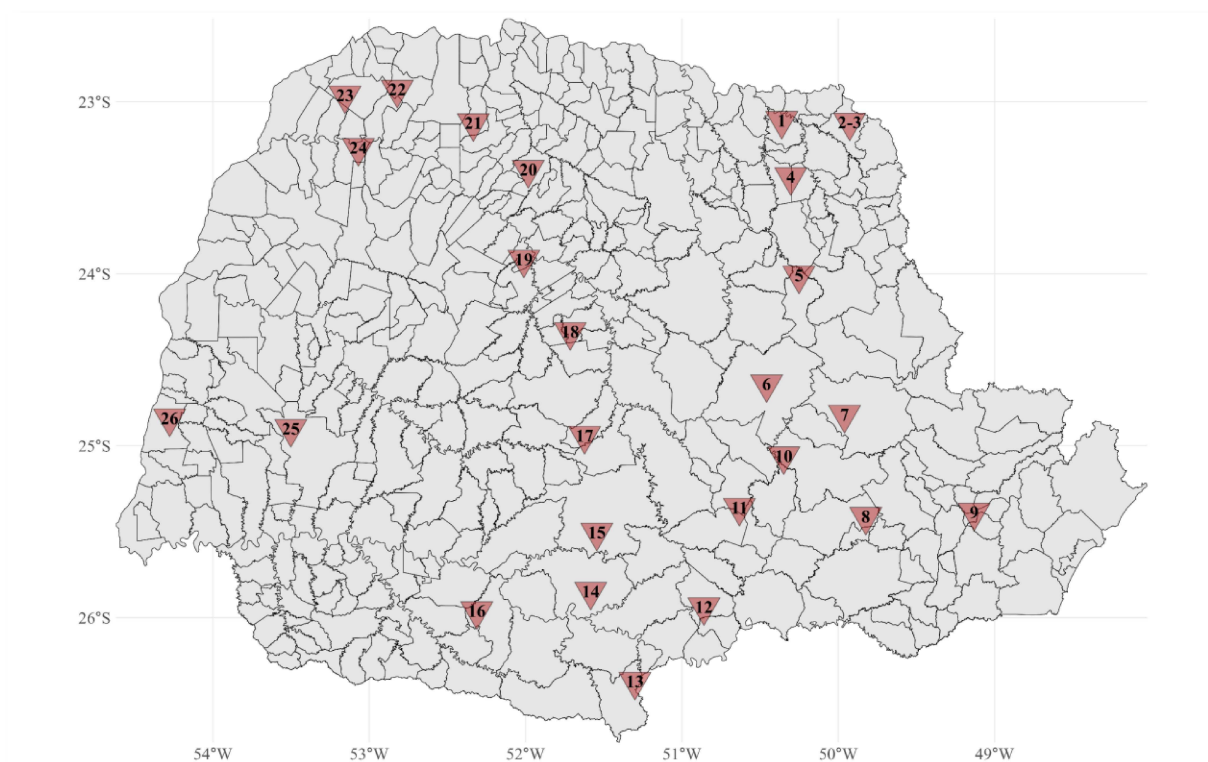
**Tabela 1.** Identificação, classificação e coordenadas geográficas dos pontos de coleta de solo no estado do Paraná.

| ID | Classificação | Local          | Coordenadas geográficas |           | Altitude<br>m |
|----|---------------|----------------|-------------------------|-----------|---------------|
|    |               |                | Latitude                | Longitude |               |
| 1  | LV            | Bandeirantes   | -23,1104                | -50,3616  | 445           |
| 2  | PV            | Jacarezinho -1 | -23,1201                | -49,9268  | 464           |
| 3  | PVA           | Jacarezinho -2 | -23,1084                | -49,9497  | 443           |
| 4  | PVA           | R. do Pinhal   | -23,4376                | -50,3038  | 523           |
| 5  | RR            | Ventania       | -24,0097                | -50,2516  | 761           |
| 6  | LV            | Tibagi         | -24,6418                | -50,4583  | 818           |
| 7  | LB            | Castro         | -24,8196                | -49,9599  | 1004          |
| 8  | PVA           | Palmeira       | -25,4129                | -49,8239  | 1000          |

|    |     |                |          |          |      |
|----|-----|----------------|----------|----------|------|
| 9  | LB  | Pinhais        | -25,3881 | -49,1308 | 921  |
| 10 | PVA | Ponta Grossa   | -25,0605 | -50,3487 | 859  |
| 11 | CH  | Imbituva       | -25,3602 | -50,6324 | 808  |
| 12 | RR  | Mallet         | -25,9384 | -50,859  | 856  |
| 13 | NB  | Gen. Carneiro  | -26,3712 | -51,3009 | 1096 |
| 14 | CH  | Pinhão         | -25,8481 | -51,5834 | 1212 |
| 15 | LB  | Guarapuava     | -25,5047 | -51,5444 | 1042 |
| 16 | LV  | Mangueirinha   | -25,9614 | -52,3123 | 921  |
| 17 | LV  | B. V. S. Roque | -24,9417 | -51,6228 | 1005 |
| 18 | LV  | Ivaiporã       | -24,3378 | -51,7146 | 763  |
| 19 | NV  | Fenix          | -23,9166 | -52,0114 | 345  |
| 20 | NV  | Maringá        | -23,3947 | -51,983  | 516  |
| 21 | PV  | Alto Paraná    | -23,1237 | -52,3341 | 490  |
| 22 | PV  | Guairaçá       | -22,9286 | -52,821  | 471  |
| 23 | PV  | Loanda         | -22,9623 | -53,1554 | 432  |
| 24 | RR  | Tapira         | -23,268  | -53,0695 | 288  |
| 25 | LV  | Cascavel       | -24,9014 | -53,5017 | 671  |
| 26 | NV  | Santa Helena   | -24,8405 | -54,2771 | 235  |

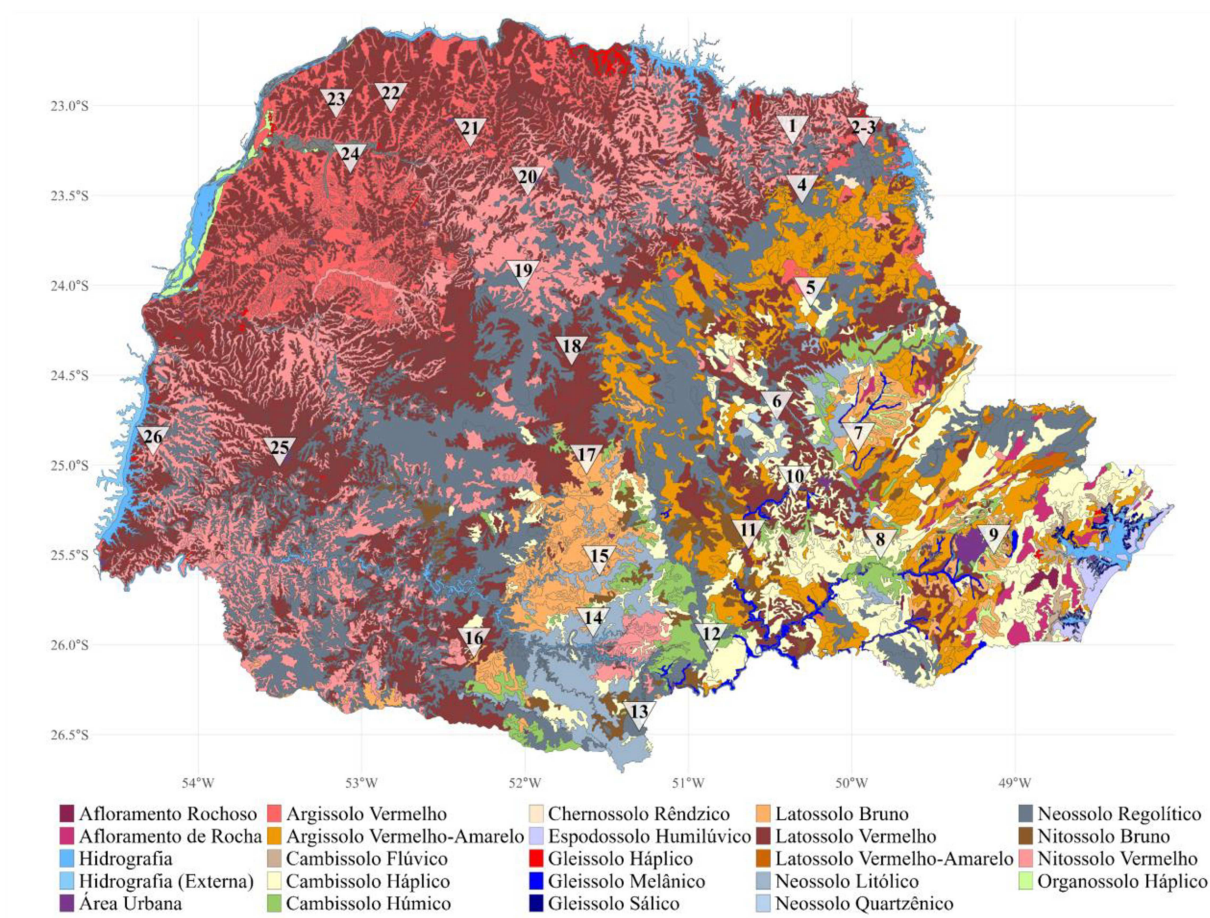
LV: Latossolo Vermelho; PV: Argissolo Vermelho; PVA: Argissolo Vermelho - Amarelo; RR: Neossolo Regolítico; LB: Latossolo Bruno; CH: Cambissolo Húmico; NB: Nitossolo Bruno; NV: Nitossolo Vermelho.

**Fonte:** Elaboração do autor (2025).



**Figura 1.** Distribuição dos pontos coletados em municípios paranaenses. Base cartográfica: Instituto Água e Terra – IAT.

**Fonte:** Elaboração do autor (2025).



**Figura 2.** Distribuição dos pontos coletados em unidades de mapeamento pedológico no estado do Paraná. Base cartográfica: Bhering *et al.* (2008).

**Fonte:** Elaboração do autor (2025).

### 5.3 Análise granulométrica

Análise granulométrica foi realizada por meio do método do densímetro. A dispersão mecânica e a estabilização das amostras foram realizadas conforme a metodologia adaptada de Donagemma *et al.* (2017). Alíquotas de 50g de TFSA foram alocadas em garrafas Stohlmann de capacidade de 500ml e 4,7 cm de diâmetro interno. A dispersão e a estabilização ocorreram por meio da agitação a 30rpm em agitador tipo Wagner em meio à solução dispersante NaOH 1 mol L<sup>-1</sup> por 4h 30 minutos. A umidade residual dos solos foi corrigida por meio do fator de correção (f), determinado conforme Viana *et al.* (2017). Solos com teor de matéria orgânica (M.O) acima de 5,0 %, antes da dispersão e estabilização, procedeu-se com a oxidação da M.O via peróxido de hidrogênio a 30V, conforme descrito por Donagemma *et al.* (2017).

O procedimento das leituras da densidade das suspensões e a estimativa das frações areia, silte e argila foram realizadas conforme a metodologia proposta por Boyocus (1962).

Após o tempo de agitação, as suspensões foram alocadas em provetas de capacidade de 1000mL, completando o volume com água deionizada (estando o hidrômetro dentro da suspensão). Antes da primeira leitura, as suspensões foram agitadas vigorosamente por um minuto, com o auxílio de um bastão com tampa de borracha. A primeira leitura, correspondente às frações de silte e argila, foi efetuada com a submersão do densímetro na suspensão e com leitura após 40 segundos do início do repouso (tempo de decantação da fração areia). A fração areia foi determinada pela subtração do total das quantidades das frações de silte e argila. A leitura da suspensão argila ocorreu após o tempo de sedimentação de 2 horas após o início do repouso (Tabela 2).

**Tabela 2.** Teores de areia, silte e argila determinados pelo método do densímetro, de solos coletados numa camada de 0-20cm, localizados no estado do Paraná.

| ID | Local          | Areia              | Silte | Argila | M.O. S |
|----|----------------|--------------------|-------|--------|--------|
|    |                | g kg <sup>-1</sup> |       |        | %      |
| 1  | Bandeirantes   | 155                | 146   | 698    | 3,3    |
| 2  | Jacarezinho -1 | 531                | 170   | 299    | 2,8    |
| 3  | Jacarezinho -2 | 742                | 66    | 192    | 0,7    |
| 4  | R. do Pinhal   | 586                | 131   | 282    | 1,2    |
| 5  | Ventania       | 685                | 117   | 198    | 1,9    |
| 6  | Tibagi         | 272                | 125   | 603    | 5,4*   |
| 7  | Castro         | 355                | 97    | 549    | 22,8*  |
| 8  | Palmeira       | 499                | 216   | 285    | 1,2    |
| 9  | Pinhais        | 330                | 94    | 576    | 12,1*  |
| 10 | Ponta Grossa   | 269                | 138   | 593    | 8,0*   |
| 11 | Imbituva       | 230                | 180   | 590    | 15,2*  |
| 12 | Mallet         | 367                | 193   | 440    | 3,7    |
| 13 | Gen. Carneiro  | 133                | 190   | 676    | 8,1*   |
| 14 | Pinhão         | 241                | 218   | 541    | 19,3*  |
| 15 | Guarapuava     | 103                | 104   | 792    | 5,5*   |
| 16 | Mangueirinha   | 104                | 187   | 708    | 5,7*   |
| 17 | B. V. S. Roque | 110                | 212   | 678    | 6,9*   |
| 18 | Ivaiporã       | 209                | 99    | 692    | 7,9*   |
| 19 | Fenix          | 6                  | 310   | 684    | 4,3    |
| 20 | Maringá        | 142                | 209   | 649    | 3,5    |
| 21 | Alto Paraná    | 808                | 20    | 172    | 0,3    |
| 22 | Guairaçá       | 802                | 26    | 172    | 0,7    |
| 23 | Loanda         | 829                | 20    | 151    | 0,6    |
| 24 | Tapira         | 828                | 20    | 152    | 1,0    |
| 25 | Cascavel       | 160                | 189   | 651    | 4,7    |
| 26 | Santa Helena   | 17                 | 359   | 624    | 3,0    |

\* Solos com teor de M.O superior a 5%, procedeu-se com a oxidação da matéria orgânica do solo (M.O.S) via peróxido de hidrogênio.

**Fonte:** Elaboração do autor (2025).

#### 5.4 Determinação da capacidade máxima de retenção de água

A capacidade máxima de retenção de água (CMR) foi determinada conforme a metodologia adaptada de Nelson *et al.* (2024). Utilizaram-se papéis filtro Whatman #1, com diâmetro 12,5 cm, dobrados em quadrantes para formar um cone e posicionados sobre um recipiente-base. Os papéis filtro foram previamente saturados com água deionizada. Na sequência, 10cm<sup>3</sup> de amostras de TFSA foram acomodadas sobre o papel filtro úmido.

As amostras foram umedecidas lentamente a partir da borda externa do filtro, de forma a assegurar a saturação por capilaridade (Figura 3A). Em seguida, os conjuntos foram cobertos com sacos plásticos transparentes para minimizar o efeito da evaporação (Figura 3B). Após 6h, foram aferidas as massas dos solos drenados. Posteriormente, as amostras foram secas em forno a 107°C por 13h para a determinação das massas secas. A CMR foi então determinada conforme:

$$CMR = \frac{(m_{\text{sat}} + R) - (m_s + R)}{m_s} \times 100$$

Onde,  $m_{\text{sat}}$  é a massa do solo drenado;  $m_s$  é a massa do solo seco e R é a massa do recipiente.



**Figura 3.** Procedimento para determinação da CMR. Saturação por capilaridade(A), drenagem do excesso de água por gravidade (B).

**Imagem:** do autor (2025).

#### 5.5 Correção do pH dos solos

As doses de referência do corretivo de acidez utilizadas foram estabelecidas com base no método do índice SMP.

##### 5.5.1 Determinação do pH, do índice SMP e da acidez total iniciais

O pH em  $\text{CaCl}_2$  e o índice SMP foram determinados de acordo com o método descrito por Quaggio e Raij (2001). Aliquotas de  $10 \text{ cm}^3$  das amostras de TFSA foram acondicionadas em recipientes plásticos com tampa e colocadas em contato estático por 15 minutos em meio a  $25 \text{ cm}^3$  de solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ . Em seguida, as suspensões foram agitadas durante 10 minutos em agitador horizontal de movimento circular a 220 rpm e colocadas em repouso por 30 minutos.

Para a determinação do índice SMP ( $\text{pH}_{\text{SMP}}$ ), utilizaram-se os mesmos recipientes previamente empregados nas leituras de pH. A cada um deles foram adicionados  $5 \text{ cm}^3$  da solução tampão SMP. As suspensões foram agitadas em agitador horizontal circular a 220 rpm por 15 minutos e mantidas em repouso por 60 minutos. Acidez total ( $\text{H} + \text{Al}$ ) foi determinada indiretamente por meio da relação entre  $\text{pH}_{\text{SMP}}$  e o  $\text{H} + \text{Al}$ .

### 5.5.2 Ajustes das doses de calcário

Utilizou-se a cal hidratada composta por 48% de  $\text{CaO}$  (óxido de cálcio) e 24% de  $\text{MgO}$  (óxido de magnésio), com PRNT de 133,44 %, conforme as especificações do fabricante. Volumes de  $50 \text{ cm}^3$  de TFSA foram acondicionados em sacos plásticos transparentes (“zip lock”). Em seguida, aplicaram-se doses correspondentes a 0%, 70%, 100% e 130% da necessidade de calagem estimada para elevar o pH em  $\text{H}_2\text{O}$  do solo até 6,0. As doses aplicadas foram homogeneizadas ao solo e, posteriormente, as amostras foram lacradas e incubadas por 30 dias com umidades equivalentes a 50 % a 60% da CRM, em duplicata (Figura 4). Os solos foram umedecidos com água deionizada. Semanalmente, as amostras foram revolvidas para melhor homogeneização.



**Figura 4.** Solos incubados com 0%, 70%, 100% e 130% da necessidade de calagem.

**Imagem:** do autor (2025).

A dose de corretivo para atingir pH 5,5 em  $\text{CaCl}_2$  foi calculada de acordo com a relação entre a quantidade do corretivo e o pH. Cada segmento de reta foi definido com base em dois pontos adjacentes da curva de resposta (Raij, Cantarella e Zullo, 1979).

As doses do corretivo para atingir o valor de pH 5,5 em  $\text{CaCl}_2$  foram aplicadas e homogeneizadas em 3,0 kg de solo. Os solos foram umedecidos com água deionizada até atingirem umidade equivalente de 50% a 60% da CMR e, posteriormente, incubados por 30 dias.

**Tabela 3.** Caracterização inicial dos solos coletados no estado do Paraná, na profundidade 0-20cm, e determinação da necessidade de calagem para ajuste do pH a 5,5 em CaCl<sub>2</sub>.

| Local              | <sup>(1)</sup> CMR<br>% | pH inicial<br>CaCl <sub>2</sub> | pH SMP | H+Al<br>cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | <sup>(3)</sup> NC<br>ton ha <sup>-1</sup> | <sup>(4)</sup> NC <sub>5,5</sub><br>ton ha <sup>-1</sup> |
|--------------------|-------------------------|---------------------------------|--------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| *Bandeirantes      | 54,8                    | 5,7                             | 6,3    | 3,1                                        | -----                                     | -----                                                    |
| *Jacarezinho -1    | 39,3                    | 7,0                             | 7,3    | 1,1                                        | -----                                     | -----                                                    |
| *Jacarezinho -2    | 31,6                    | 5,4                             | 7,1    | 1,3                                        | -----                                     | -----                                                    |
| Ribeirão do Pinhal | 29,0                    | 4,3                             | 6,0    | 4,1                                        | 2,3                                       | 1,3                                                      |
| Ventania           | 42,9                    | 4,2                             | 6,0    | 4,1                                        | 2,3                                       | 2,8                                                      |
| Tibagi             | 53,5                    | 3,9                             | 4,7    | 17,0                                       | 10,3                                      | 9,2                                                      |
| Castro             | 81,3                    | 3,9                             | 4,4    | 21,9                                       | 15,3                                      | 17,6                                                     |
| Palmeira           | 33,6                    | 4,1                             | 5,8    | 5,2                                        | 3,1                                       | 2,8                                                      |
| Pinhais            | 80,0                    | 4,7                             | 5,2    | 16,6                                       | 6,4                                       | 5,4                                                      |
| Ponta Grossa       | 47,9                    | 3,9                             | 4,7    | 16,6                                       | 10,3                                      | 11,0                                                     |
| Imbituva           | 83,6                    | 4,0                             | 4,3    | 24,6                                       | 15,7                                      | 15,7                                                     |
| Mallet             | 52,4                    | 3,7                             | 4,3    | 26,4                                       | 15,7                                      | 9,9                                                      |
| General Carneiro   | 66,6                    | 3,7                             | 4,3    | 24,6                                       | 15,7                                      | 11,3                                                     |
| Pinhão             | 76,1                    | 4,0                             | 4,5    | 21,2                                       | 13,8                                      | 21,0                                                     |
| Guarapuava         | 68,0                    | 4,4                             | 5,0    | 12,8                                       | 7,7                                       | 5,8                                                      |
| Mangueirinha       | 68,7                    | 3,8                             | 4,6    | 18,3                                       | 11,1                                      | 8,7                                                      |
| B. V. de São Roque | 73,6                    | 4,0                             | 4,8    | 15,6                                       | 9,2                                       | 9,2                                                      |
| Ivaiporã           | 61,5                    | 4,8                             | 5,3    | 10,1                                       | 6,0                                       | 6,6                                                      |
| *Fenix             | 58,5                    | 5,5                             | 6,1    | 4,0                                        | -----                                     | -----                                                    |
| *Maringá           | 55,3                    | 5,8                             | 6,5    | 2,5                                        | -----                                     | -----                                                    |
| Alto Paraná        | 29,5                    | 4,6                             | 6,8    | 1,8                                        | 0,3                                       | 0,4                                                      |
| Guairaçá           | 29,3                    | 4,4                             | 6,8    | 1,7                                        | 0,2                                       | 0,4                                                      |
| *Loanda            | 25,8                    | 5,1                             | 7,0    | 1,5                                        | -----                                     | -----                                                    |
| Tapira             | 27,5                    | 3,9                             | 5,8    | 5,3                                        | 3,2                                       | 1,9                                                      |
| Cascavel           | 63,4                    | 3,9                             | 4,6    | 17,7                                       | 8,7                                       | 10,7                                                     |
| *Santa Helena      | 45,4                    | 6,4                             | 6,8    | 1,8                                        | -----                                     | -----                                                    |

<sup>(1)</sup> Capacidade máxima de retenção de água. <sup>(3)</sup> Necessidade de calagem para atingir pH 6,0 em H<sub>2</sub>O. <sup>(4)</sup> Necessidade de calagem para atingir pH de 5,5 em CaCl<sub>2</sub>. \* Solos sem necessidade de correção de pH, segundo o critério estabelecido.

**Fonte:** Elaboração do autor (2025).

## **5.6 Caracterização química dos solos após a correção da acidez**

Após o período de incubação, as amostras foram secas em estufa de ventilação forçada a 60 °C, por 72 h. Posteriormente, foram destorroadas manualmente e peneiradas em peneira de malha 2mm.

### **5.6.1 Determinação do carbono orgânico total**

A determinação do carbono orgânico total foi realizada pelo método volumétrico, conforme descrito por Cantarella, Quaggio e Raij (2001). Alíquotas de 1g de solo foram alocadas em erlenmeyers em presença de solução sulfocrômica, agitadas manualmente, diluídas em água deionizada e posteriormente tituladas com solução padronizada de sulfato ferroso amoniacal. Solos com teor de matéria orgânica acima de 55 g kg<sup>-1</sup>, procedeu-se à redução da massa de solo em 0,5g, com adição suficiente de solução sulfocrômica, de modo a garantir quantidade suficiente de dicromato não reduzido para a titulação.

### **5.6.2 Determinação de cálcio e magnésio trocáveis**

Os teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> foram determinados após extração com solução de KCl 1 mol L<sup>-1</sup>, por titulometria complexométrica, em presença do indicador negro de eriocromo T, conforme a metodologia descrita por Catarella *et al.* (2001). Alíquotas de 5 cm<sup>3</sup> de solo foram acondicionadas em erlenmeyers de capacidade de 125 cm<sup>3</sup>. Em seguida, adicionaram-se 50 cm<sup>3</sup> de solução KCl 1 mol L<sup>-1</sup>. Após a agitação em agitador horizontal de movimento circular a 220 rpm por 5 minutos, as amostras foram filtradas e alíquotas de 25 cm<sup>3</sup> foram separadas para a titulação com EDTA 0,0125 mol L<sup>-1</sup>.

### **5.6.3 Determinação dos teores de P e K**

Alíquotas de 5cm<sup>3</sup> de solo foram submetidas à extração pelo método de extração ácida Mehlich-1, conforme Teixeira, Saldanha e Campos (2017). A determinação de P foi executada segundo o método colorimétrico, por meio da redução do complexo fosfomolibdico por ácido ascórbico e posterior leitura da absorbância em espectrofotômetro de absorção molecular (Murphy e Riley, 1962), no comprimento de onda de 660 nm (Teixeira, Saldanha e Campos

,2017). A quantificação de K foi realizada por fotometria de chama, conforme recomendado por Teixeira *et al.* (2017).

#### 5.6.4 Determinação do fósforo remanescente

O P remanescente foi determinado através da adição de 1g de solo em tubos falcon de capacidade de 15 ml contendo 10 ml de solução  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  com concentração de  $60 \text{ mg L}^{-1}$  de P, em duplicata. Após a agitação por 1h em agitador tipo Wagner a 30 rpm, as amostras foram centrifugadas a 3000 rpm por 15 minutos (adaptado de Alvarez *et al.*, 2000). A concentração de P do sobrenadante foi determinada pelo método colorimétrico, por meio da redução do complexo fosfomolibdico por ácido ascórbico (Murphy e Riley, 1962) e posterior leitura da absorbância em espectrofotômetro de absorção molecular, no comprimento de onda de 725 nm (Silva *et al.*, 2009). Utilizou-se o  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  p.a. como fonte de P.

Os valores de fósforo remanescente foram agrupados por meio da técnica de clusterização utilizando o algoritmo *k-means*, no software R (R Core Team, 2024, versão 4.4.1), separando-os em três classes com base em semelhanças nos valores de concentração do P remanescente (Apêndice 4).

#### 5.6.5 Determinação da capacidade máxima de adsorção de fósforo

A CMAP foi determinada por meio da utilização de curvas de sorção. As curvas foram construídas mediante a transferência de 0,5g de solo para tubos falcon de capacidade de 15 ml e equilibrados com 10 mL de soluções de P preparadas em solução de fundo  $\text{CaCl}_2$  a  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ , com nove concentrações de P distintas (Mumbach *et al.*, 2021). Utilizou-se o  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  p.a. como fonte de P.

As concentrações de P foram ajustadas conforme as classes de P remanescente (Prem). Para solos com Prem de  $0\text{--}20 \text{ mg L}^{-1}$ , utilizaram-se soluções de 0, 4, 8, 16, 32, 64, 80, 128 e  $160 \text{ mg L}^{-1}$ , equivalentes a 0, 80, 160, 320, 640, 1280, 1600, 2560 e  $3200 \text{ mg kg}^{-1}$  de P. Solos com Prem entre 20 e  $40 \text{ mg L}^{-1}$ , aplicaram-se 0, 2, 4, 8, 16, 32, 40, 64 e  $80 \text{ mg L}^{-1}$ , correspondendo a 0, 40, 80, 160, 320, 640, 1280 e  $1600 \text{ mg kg}^{-1}$  de P. Em solos com Prem  $> 40 \text{ mg L}^{-1}$ , utilizaram-se soluções de 0, 1, 2, 4, 8, 16, 20, 32 e  $40 \text{ mg L}^{-1}$ , equivalentes a 0, 20, 40, 80, 160, 320, 400, 640 e  $800 \text{ mg kg}^{-1}$  de P (adaptado de Mumbach, 2021).

As amostras foram preparadas em duplicata, agitadas em agitador tipo Wagner a 30 rpm por 16 h e, em seguida, centrifugadas a 3.000 rpm por 15 minutos. A concentração de

fósforo no sobrenadante foi determinada colorimetricamente, por meio da redução do complexo fosfomolibdico por ácido ascórbico (Murphy e Riley, 1962) e posterior leitura da absorbância em espectrofotômetro de absorção molecular, no comprimento de onda de 725 nm (Silva *et al.*, 2009).

A quantidade de P sorvido foi obtida pela diferença entre o P adicionado e o remanescente na solução de equilíbrio. Os conjuntos de dados foram ajustados à forma hiperbólica do modelo de Langmuir (Novais; Smyth; Nunes, 2007):

$$q = CMAP \times \frac{k \times C}{1 + k \times C}$$

Onde:  $q$  é a quantidade de P sorvido ( $\text{mg g}^{-1}$ );  $k$  ( $\text{L mg}^{-1}$ ) é a constante relacionada à energia de ligação;  $CMAP$  ( $\text{mg g}^{-1}$ ) é a capacidade máxima de adsorção de P e  $C$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ) é a concentração do “P remanescente” na solução de equilíbrio.

Os coeficientes  $CMAP$  e  $k$  do modelo de Langmuir foram estimados pelo método iterativo Gauss-Newton, por meio da função nativa *nls* do software R (R Core Team, 2024, versão 4.4.1). O ajuste foi realizado partindo dos valores médios de  $q$  e  $C$  (Apêndices 5,6 e 7).

Para fins de análise descritiva, os valores de  $CMAP$  foram agrupados em 5 classes de valores: muito baixo ( $<10$ ), baixo (10-100), médio (100-500), alto (500-1000) e muito alto ( $>1000$ ), de acordo com a classificação proposta por Juo e Fox (1977).

**Tabela 4.** Caracterização química das amostras coletadas no estado do Paraná, na profundidade 0-20 cm, após a correção de pH por meio da incubação com cal hidratada.

| Local             | pH<br>CaCl <sub>2</sub> | pH SMP | H+Al | Ca + Mg<br>cmolc dm <sup>-3</sup> | K<br>cmolc dm <sup>-3</sup> | CTC <sub>pH 7</sub> | <sup>(1)</sup> P <sub>inicial</sub><br>mg dm <sup>-3</sup> | <sup>(2)</sup> COT<br>g kg <sup>-1</sup> | <sup>(3)</sup> P <sub>rem</sub><br>mg L <sup>-1</sup> | <sup>(4)</sup> CMAP<br>mg kg <sup>-1</sup> | <sup>(5)</sup> k<br>L g <sup>-1</sup> |
|-------------------|-------------------------|--------|------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|
| Bandeirantes      | 5,7                     | 6,3    | 3,1  | 11,3                              | 0,13                        | 14,5                | 6,8                                                        | 19,2                                     | 32,0                                                  | 629,9                                      | 0,1                                   |
| Jacarezinho -1    | 7,0                     | 7,3    | 1,1  | 9,5                               | 0,31                        | 10,9                | 8,2                                                        | 16,0                                     | 42,7                                                  | 235,2                                      | 0,4                                   |
| Jacarezinho -2    | 5,4                     | 7,1    | 1,3  | 2,7                               | 0,26                        | 4,3                 | 2,2                                                        | 4,0                                      | 53,1                                                  | 92,6                                       | 0,6                                   |
| Rib. do Pinhal    | 5,5                     | 6,6    | 2,3  | 5,2                               | 0,10                        | 7,5                 | 1,4                                                        | 7,2                                      | 41,7                                                  | 174,7                                      | 0,6                                   |
| Ventania          | 5,3                     | 6,6    | 2,2  | 5,3                               | 0,15                        | 7,6                 | 5,7                                                        | 11,2                                     | 49,9                                                  | 167,3                                      | 0,4                                   |
| Tibagi            | 5,6                     | 6,1    | 3,4  | 13,4                              | 0,36                        | 17,2                | 2,0                                                        | 31,2                                     | 24,3                                                  | 757,6                                      | 0,9                                   |
| Castro            | 5,6                     | 5,8    | 4,8  | 23,7                              | 0,18                        | 28,6                | 6,8                                                        | 131,9                                    | 0,8                                                   | 2924,0                                     | 1,7                                   |
| Palmeira          | 5,4                     | 6,6    | 2,3  | 4,3                               | 0,05                        | 6,6                 | 9,7                                                        | 6,8                                      | 50,0                                                  | 160,9                                      | 0,5                                   |
| Pinhais           | 5,7                     | 5,9    | 4,3  | 26,7                              | 0,15                        | 31,1                | 6,8                                                        | 70,4                                     | 20,0                                                  | 1655,0                                     | 0,1                                   |
| Ponta Grossa      | 5,7                     | 6,0    | 3,7  | 11,6                              | 0,26                        | 15,5                | 2,2                                                        | 46,4                                     | 10,9                                                  | 1591,8                                     | 0,1                                   |
| Imbituva          | 5,6                     | 5,8    | 5,2  | 28,0                              | 0,20                        | 33,4                | 3,9                                                        | 88,0                                     | 1,5                                                   | 2929,5                                     | 0,6                                   |
| Mallet            | 5,6                     | 6,2    | 3,3  | 9,9                               | 0,10                        | 13,3                | 3,5                                                        | 21,6                                     | 17,4                                                  | 1237,7                                     | 0,1                                   |
| General Carneiro  | 5,7                     | 6,0    | 4,2  | 14,9                              | 0,05                        | 19,2                | 0,9                                                        | 39,2                                     | 13,5                                                  | 2199,0                                     | 0,2                                   |
| Pinhão            | 5,9                     | 6,2    | 3,5  | 27,4                              | 0,10                        | 31,0                | 7,5                                                        | 111,9                                    | 2,4                                                   | 2591,8                                     | 0,3                                   |
| Guarapuava        | 5,6                     | 5,8    | 5,1  | 12,7                              | 0,18                        | 18,0                | 0,8                                                        | 47,2                                     | 14,2                                                  | 1800,3                                     | 0,1                                   |
| Mangueirinha      | 5,7                     | 6,2    | 3,1  | 12,0                              | 0,10                        | 15,1                | 1,7                                                        | 32,8                                     | 22,1                                                  | 1028,5                                     | 0,2                                   |
| B. V. de S. Roque | 5,4                     | 5,7    | 5,6  | 11,4                              | 0,10                        | 17,2                | 2,1                                                        | 40,0                                     | 7,9                                                   | 2442,3                                     | 0,2                                   |
| Ivaiporã          | 5,9                     | 6,2    | 3,1  | 15,4                              | 0,18                        | 18,8                | 1,9                                                        | 45,6                                     | 12,4                                                  | 1558,8                                     | 0,1                                   |
| Fenix             | 5,5                     | 6,1    | 4,0  | 12,2                              | 0,26                        | 16,4                | 4,6                                                        | 24,8                                     | 30,4                                                  | 667,5                                      | 0,2                                   |
| Maringá           | 5,8                     | 6,5    | 2,5  | 11,0                              | 0,20                        | 13,8                | 0,8                                                        | 20,0                                     | 31,0                                                  | 571,2                                      | 0,4                                   |
| Alto Paraná       | 6,0                     | 7,4    | 0,9  | 3,6                               | 0,05                        | 4,6                 | 3,4                                                        | 2,0                                      | 52,1                                                  | 117,3                                      | 0,6                                   |
| Guairaçá          | 6,0                     | 7,4    | 1,7  | 3,3                               | 0,05                        | 5,1                 | 2,7                                                        | 4,0                                      | 53,0                                                  | 93,3                                       | 0,5                                   |
| Loanda            | 5,1                     | 7,0    | 1,5  | 2,9                               | 0,05                        | 4,4                 | 3,7                                                        | 3,2                                      | 54,8                                                  | 29,3                                       | 0,4                                   |
| Tapira            | 5,2                     | 6,6    | 2,1  | 3,5                               | 0,03                        | 5,6                 | 0,6                                                        | 6,0                                      | 53,8                                                  | 128,7                                      | 0,6                                   |
| Cascavel          | 5,6                     | 6,0    | 4,5  | 11,5                              | 0,20                        | 16,2                | 0,8                                                        | 27,2                                     | 22,1                                                  | 1000,7                                     | 0,2                                   |
| Santa Helena      | 6,4                     | 6,8    | 1,8  | 12,2                              | 0,26                        | 14,3                | 1,2                                                        | 17,6                                     | 28,4                                                  | 708,6                                      | 0,2                                   |

<sup>(1)</sup> Teor de fósforo extraído por Mehlich-1. <sup>(2)</sup> Teor de carbono orgânico total. <sup>(3)</sup> Fósforo remanescente. <sup>(4)</sup> Capacidade máxima de adsorção de fósforo. <sup>(5)</sup> Constante de ligação do modelo de Langmuir.

**Fonte:** Elaboração do autor (2025).

## 5.7 Determinação da capacidade de tamponamento de fósforo em solos do estado do Paraná

O ensaio foi conduzido nas dependências da Universidade Estadual do Norte do Paraná, em delineamento em blocos casualizados. Os solos foram incubados com 12 doses de P distintas, com 3 repetições. As unidades experimentais foram constituídas de amostras de solo de 50g, acondicionadas em sacos transparentes “zip lock” e incubadas por 20 dias com umidade entre 40% a 60% da CMR, na ausência de luz. As amostras permaneceram estáticas e lacradas durante o período de incubação. Utilizou-se recipientes plásticos contendo água para auxiliar na manutenção da umidade local.

A solução concentrada de P foi preparada a partir de aproximadamente 125g do fertilizante superfosfato triplo (SFT). O fertilizante foi finamente moído e adicionado em 1L de água deionizada. A mistura foi agitada por cerca de 20h em agitador tipo Wagner a 30 rpm. Posteriormente, a separação da fração sólida foi realizada por meio duas filtragens consecutivas: filtro de café e filtro quantitativo (de filtração média). O volume foi completado com água deionizada até atingir em torno de 2,4 L. A determinação da concentração de P foi estimada a partir de uma amostra submetida a uma diluição seriada em duas etapas, por meio da redução do complexo fosfomolibdico por ácido ascórbico e posterior leitura da absorbância em espectrofotômetro de absorção molecular (Murphy e Riley, 1962), no comprimento de onda de 725nm (Alvarez *et al.*, 2017). A solução final apresentou concentração de  $8442,704 \pm 94,180 \text{ mg L}^{-1}$  de P (CV=1,115%), com densidade média de  $1,024 \pm 0,001 \text{ g cm}^{-3}$  (CV = 0,977%).

As doses de P para incubação foram determinadas a partir da CMAP. Os solos foram agrupados de acordo com a faixa de valores de CMAP (adaptado de Mumbach, 2021). Grupo 1: solos com CMAP entre 0 e 500  $\text{mg kg}^{-1}$ ; grupo 2: solos com CMAP entre 500 e 1250  $\text{mg kg}^{-1}$ ; grupo 3 solos com CMAP entre 1250 e 2500  $\text{kg}^{-1}$ ; grupo 4 solos com CMAP entre 2500 e 3000  $\text{mg kg}^{-1}$  (Tabela 5). A quantidade de solução necessária foi adicionada com base em sua massa, aferida com balança de precisão.

Após o período de incubação, as amostras foram secas em estufa de ventilação forçada a 65 °C por 48 h e, posteriormente destorroadas manualmente e peneiradas em peneira de malha 2mm. Aliquotas de 5 $\text{cm}^3$  de solo foram submetidas à extração pelo método de extração ácida Mehlich-1. A determinação de P foi executada segundo o método colorimétrico, por meio da redução do complexo fosfomolibdico por ácido ascórbico e posterior leitura da absorbância em espectrofotômetro de absorção molecular (Murphy e Riley, 1962), no comprimento de onda de

660 nm (Teixeira, Saldanha e Campos (2017). Para fins de extrapolação das doses em  $\text{mg kg}^{-1}$  para  $\text{kg ha}^{-1}$ , adotou-se como densidade padrão dos solos o valor de  $1 \text{ kg dm}^{-3}$ .

A modelagem matemática das relações entre a quantidade de P aplicada e as recuperadas pelo extrator Mehlich-1 foram descritas por meio de regressões segmentadas lineares. O ajuste foi realizado por meio da função *segmented()* do pacote *segmented* (Muggeo, 2008), no software R-Studio (R Core Team, 2024, versão 4.4.1), conforme:

$$\beta_0 + \beta_1 z_i + \beta_2 (z_i - \psi)^+$$

$$(z_i - \psi)^+ = \begin{cases} 0, & \text{se } z_i \leq \psi \\ (z_i - \psi), & \text{se } z_i > \psi \end{cases}$$

Onde,  $\psi$  é o ponto de quebra,  $\beta_0$  é o intercepto,  $\beta_1$  é a inclinação antes do ponto de quebra,  $\beta_2$  é a acréscimo de inclinação depois do ponto de quebra.

As capacidades de tamponamento de P (CTP) foram determinadas pelo inverso dos coeficientes angulares das retas ajustadas.

**Tabela 5.** Agrupamento dos solos em função da CMAP e doses P utilizadas na incubação de solos coletados no estado do Paraná.

| Grupo | Local                                                                                                                | <sup>(1)</sup> Dose de P<br>$\text{mg kg}_{\text{solo}}^{-1}$ |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1     | Alto Paraná, Guairaçá,<br>Jacarezinho-1, Jacarezinho-2<br>Loanda, Palmeira, Ribeirão<br>do Pinhal, Tapira, Ventania. | 0                                                             |
|       |                                                                                                                      | 5                                                             |
|       |                                                                                                                      | 10                                                            |
|       |                                                                                                                      | 15                                                            |
|       |                                                                                                                      | 20                                                            |
|       |                                                                                                                      | 25                                                            |
|       |                                                                                                                      | 30                                                            |
|       |                                                                                                                      | 40                                                            |
|       |                                                                                                                      | 50                                                            |
|       |                                                                                                                      | 125                                                           |
|       |                                                                                                                      | 250                                                           |
|       |                                                                                                                      | 500                                                           |
| 2     | Bandeirantes, Cascavel,<br>Fenix, Maringá, Mallet,<br>Mangueirinha, Santa Helena,<br>Tibagi.                         | 0                                                             |
|       |                                                                                                                      | 6                                                             |
|       |                                                                                                                      | 12                                                            |
|       |                                                                                                                      | 20                                                            |
|       |                                                                                                                      | 25                                                            |
|       |                                                                                                                      | 40                                                            |
|       |                                                                                                                      | 50                                                            |
|       |                                                                                                                      | 75                                                            |
|       |                                                                                                                      | 150                                                           |
|       |                                                                                                                      | 325                                                           |
| 3     | B.V. de São Roque, General<br>Carneiro, Guarapuava,                                                                  | 625                                                           |
|       |                                                                                                                      | 1250                                                          |
|       |                                                                                                                      | 0                                                             |
|       |                                                                                                                      | 25                                                            |

|   |                                  |      |
|---|----------------------------------|------|
| 4 | Ivaiporã, Pinhais, Ponta Grossa. | 50   |
|   |                                  | 75   |
|   |                                  | 100  |
|   |                                  | 125  |
|   |                                  | 150  |
|   |                                  | 185  |
|   |                                  | 250  |
|   |                                  | 625  |
|   |                                  | 1250 |
|   |                                  | 2500 |
|   | Castro, Imbituva, Pinhão.        | 0    |
|   |                                  | 25   |
|   |                                  | 50   |
|   |                                  | 75   |
|   |                                  | 100  |
|   |                                  | 125  |
|   |                                  | 150  |
|   |                                  | 185  |
|   |                                  | 250  |
|   |                                  | 750  |
|   |                                  | 1500 |
|   |                                  | 3000 |

<sup>(1)</sup> Doses de P estabelecidas de acordo com Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo.

**Fonte:** Elaboração do autor (2025).

### 5.7.1 Inclinações do primeiro segmento das regressões segmentadas

As inclinações antes dos pontos de quebras das equações segmentadas foram utilizadas para representar a capacidade de tamponamento de P (CTP<sub>1</sub>). Essa escolha partiu da premissa de que esses segmentos representam o regime inicial da relação entre doses de P aplicadas e os teores recuperados pelo extrator Mehlich-1, abrangendo com segurança as faixas de condições em que situam os níveis críticos de fósforo.

Considerou-se, neste estudo, como nível crítico (N<sub>c</sub>) o teor de P correspondente ao limite superior da classe “médio”, representando 90% da produtividade máxima relativa, conforme os critérios estabelecidos pela SBCS/NEPAR (2019).

### 5.7.2 Seleção dos parâmetros para compor o modelo de predição da capacidade de tamponamento de P

As variáveis CTP<sub>1</sub>, altitude, CMAP, Prem, COT, CTC<sub>pH 7</sub>, P<sub>inicial</sub> e teor de argila foram submetidas à análise exploratória multivariada por meio da Análise de Componentes Principais

(PCA), com o objetivo identificar padrões de colinearidade (redundância explicativa). O conjunto de dados foi padronizado de modo que apresentassem media zero e variância igual a um (Barbosa *et al.*, 2018), com a finalidade de minimizar o desequilíbrio entre as diferentes escalas das variáveis. A padronização foi realizada por meio do argumento *scale.unit = TRUE* da função *PCA*, implementada no software R (R Core Team, 2024, versão 4.4.1).

As análises de correlações foram utilizadas para auxiliar a seleção de parâmetros para compor os modelos. O modelo de predição foi construído a partir da seleção do(s) parâmetro(s) de maior sensibilidade e praticidade de obtenção, submetidos à análise de regressão simples e múltipla por meio da função nativa *lm()* do software R (R Core Team, 2024, versão 4.4.1). O critério de seleção dos modelos baseou-se na avaliação do Critério de Informação de Akaike (AIC), da raiz do erro quadrático médio (RMSE) e do coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

## 5.8 Quantificação das doses de P para adubação fosfatada de correção com base na capacidade de tamponamento dos solos

A dose necessária para a adubação de correção foi estimada com base na equação modificada proposta por Souza, Lobato e Rein (2006):

$$D_{ff}(kg\ ha^{-1}\ de\ P_2O_5) = (P_{final} - P_{inicial}) \times CTP_1 \times 2,29 \times \left(\frac{p}{20}\right)$$

Onde  $CTP_1$  é a capacidade de tamponamento de P em kg de P  $ha^{-1}$ ; 2,29 é o fator de conversão de P para  $P_2O_5$ ;  $p$  é a profundidade de correção desejada em cm e  $D_{ff}$  é a dose necessária para elevar o teor de P até o nível desejado.

## 5.9 Construção de tabelas para determinação da capacidade de tamponamento e simulação de doses de adubação fosfatada corretiva total

As tabelas para determinação da  $CTP_1$  em função do teor de argila foram construídas utilizando dois métodos distintos: (i) o agrupamento direto dos valores observados de  $CTP_1$  dentro das classes de argila e níveis críticos de P pré-estabelecidas conforme a SBCS/ NEPAR (2019); e (ii) a estimativa da  $CTP_1$  por meio do modelo exponencial ajustado dentro das classes de argila propostos por Sousa *et al.* (2016).

A simulação das doses de adubação fosfatada corretiva total foi calculada por meio da equação modificada proposta por Sousa, Lobato e Rein (2006), utilizando como referência os valores de  $CTP_1$  obtidos por meio do agrupamento dentro das classes de argila pré-estabelecidas

pela SBCS/ NEPAR (2019). Adicionalmente, para fins de comparação, as doses calculadas para atingir o nível crítico de P, estimadas a partir da  $CTP_1$ , foram agrupadas em classes de disponibilidade de P e comparadas às doses recomendadas para a cultura da soja, considerando uma expectativa de produtividade de  $4 \text{ t ha}^{-1}$ , conforme a SBCS/NEPAR (2019).

A quantidade média de P exportada nos grãos de soja foi tomada como equivalente a  $18 \text{ kg de P ha}^{-1}$  ( $41,2 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ) (SBCS/NEPAR, 2019). As estimativas das doses de adubação de correção “implícitas” foram obtidas subtraindo-se a quantidade de  $\text{P}_2\text{O}_5$  exportada pelos grãos de soja das doses totais de  $\text{P}_2\text{O}_5$  recomendadas.

### 5.10 Estimativa da capacidade de tamponamento de fósforo do Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná

A estimativa da  $CTP_{NEPAR}$  foi realizada por meio da equação proposta por Duarte *et al.*, (2026), conforme:

$$CTP_{NEPAR} = \left( \frac{F - E}{N_C - P_{Classe}} \right)$$

Onde  $CTP_{NEPAR}$  é a estimativa da capacidade de tamponamento de P em  $\text{kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ;  $F$  é a quantidade recomendada de  $\text{P}_2\text{O}_5$  em  $\text{kg ha}^{-1}$ ;  $E$  é quantidade de  $\text{P}_2\text{O}_5$  exportada pela cultura da soja em  $\text{kg ha}^{-1}$ ;  $N_C$  é o nível crítico de P, em  $\text{mg dm}^{-3}$ ; e  $P_{Classe}$  corresponde ao valor médio representativo do teor de P na classe de disponibilidade “muito baixo”, em  $\text{mg dm}^{-3}$ .

## 6 RESULTADOS

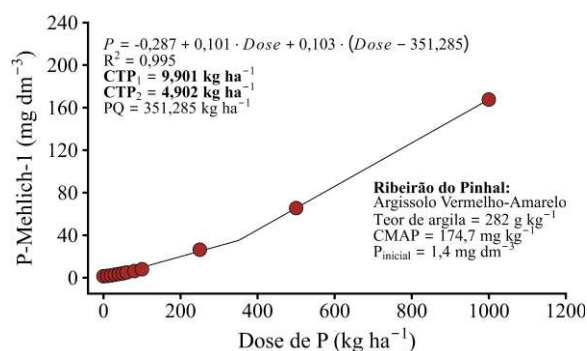
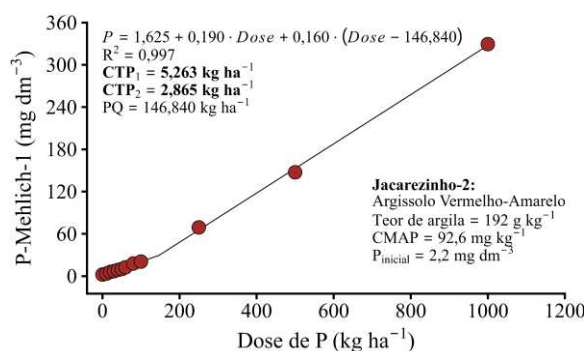
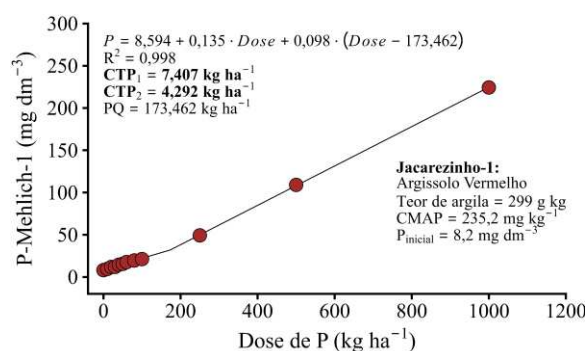
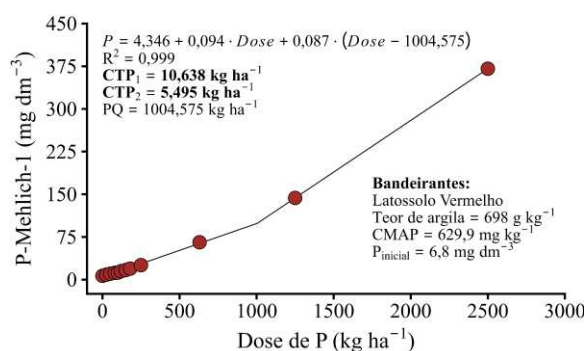
### 6.1 Capacidades de tamponamento de P: visualização geral das regressões segmentadas e regressões lineares simples

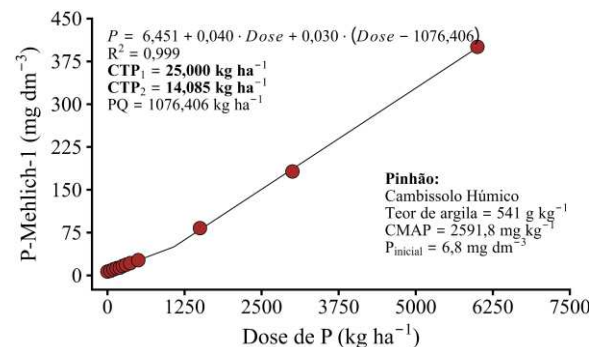
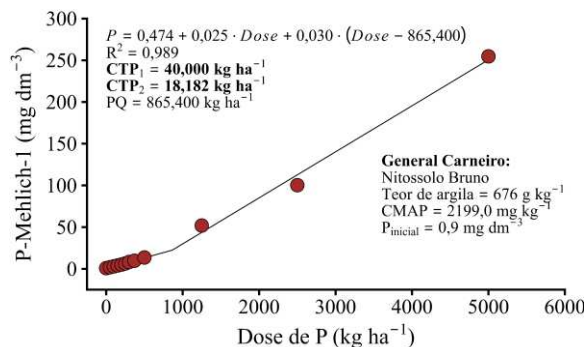
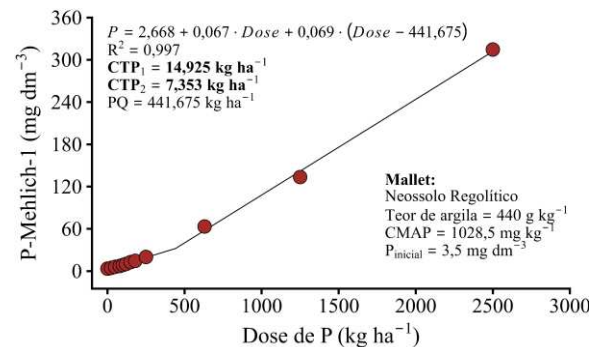
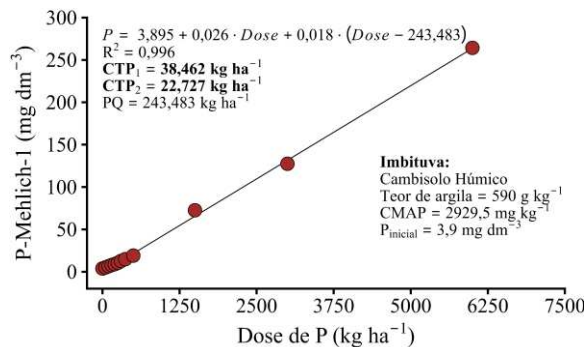
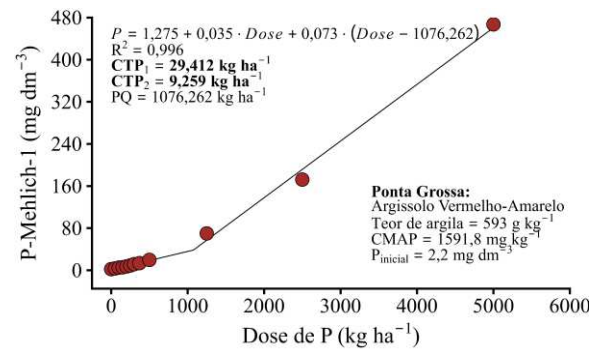
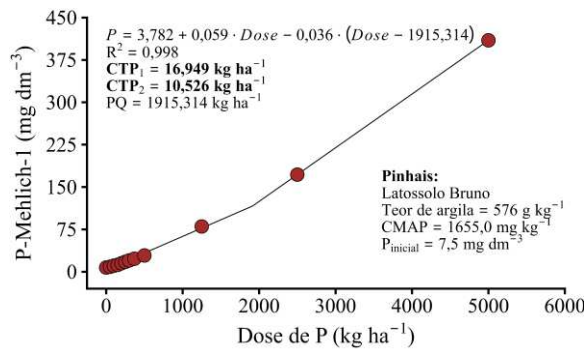
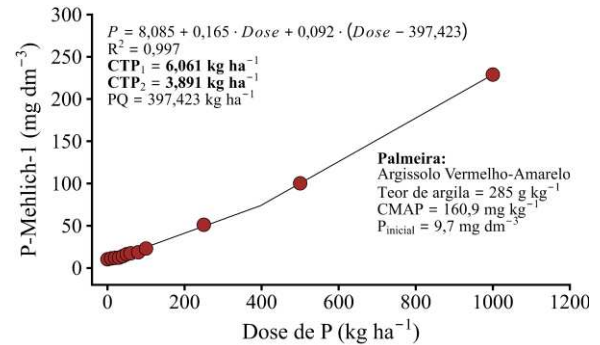
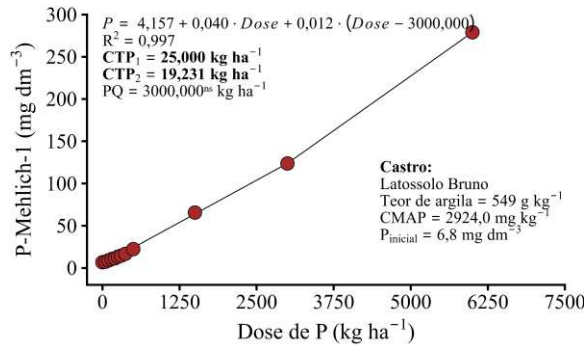
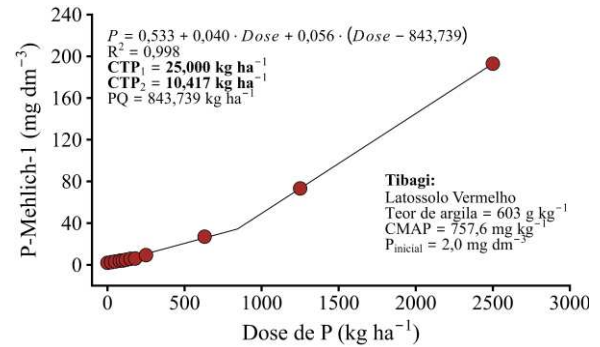
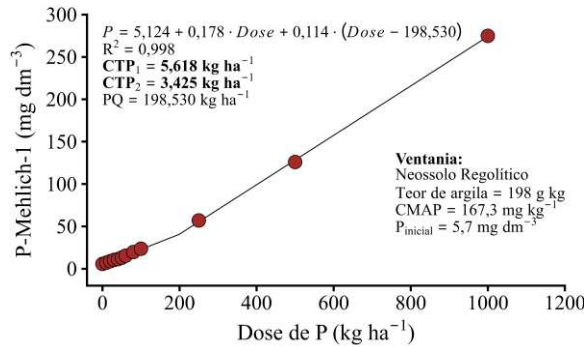
O Gráfico 1 apresenta as relações entre os teores de P recuperados pelo extrator Mehlich-1 em função das doses de P aplicadas, após o período de 20 dias de incubação. Todos os solos apresentaram aumento de P extraível com o aumento das doses, entretanto com comportamentos distintos. Para a maioria dos solos, houve alteração no comportamento das relações entre as duas variáveis. Nesses solos, os modelos de regressão segmentadas apresentaram convergência adequada, com estabilização com poucas iterações. A estimativa do ponto de quebra mostrou-se consistente, com baixo erro-padrão, indicando estabilidade da solução e adequada identificação das mudanças de inclinações.

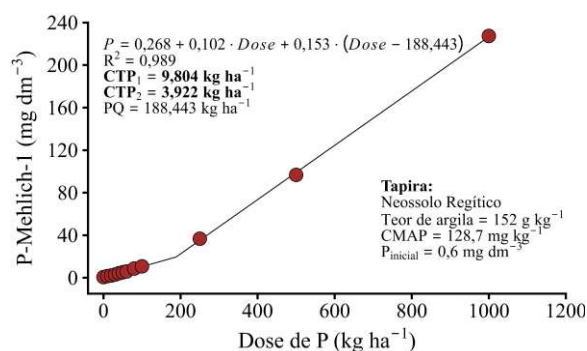
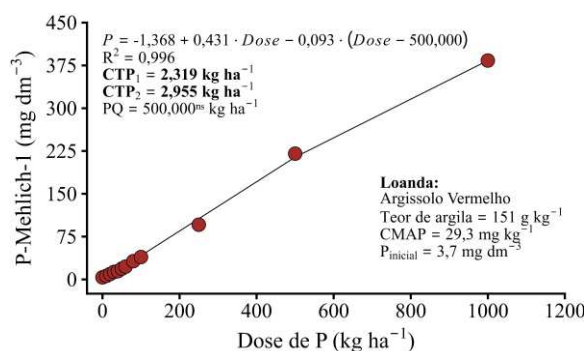
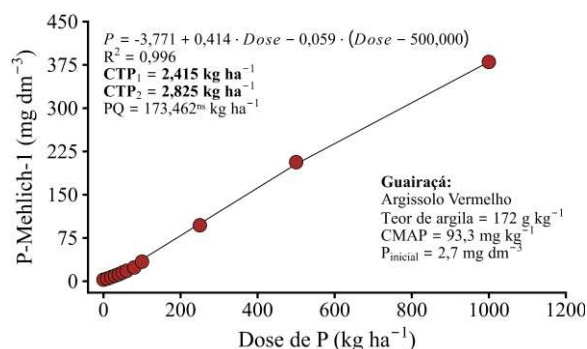
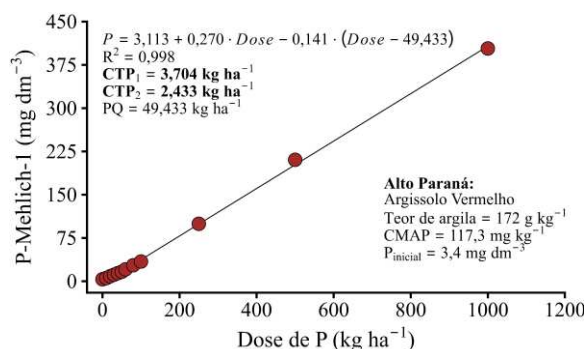
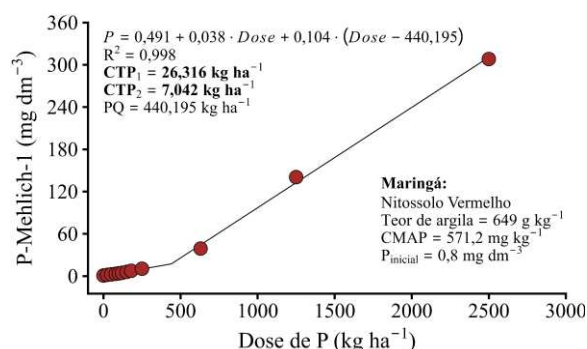
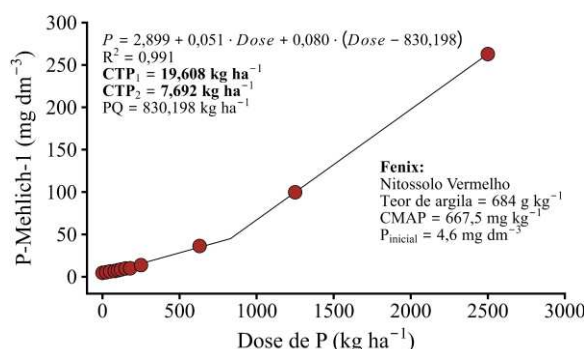
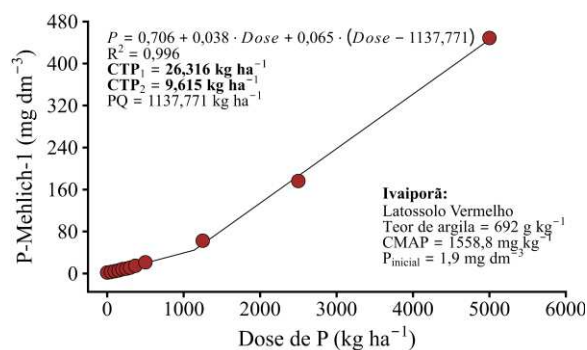
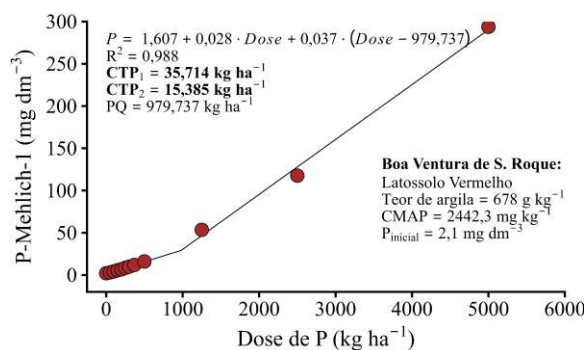
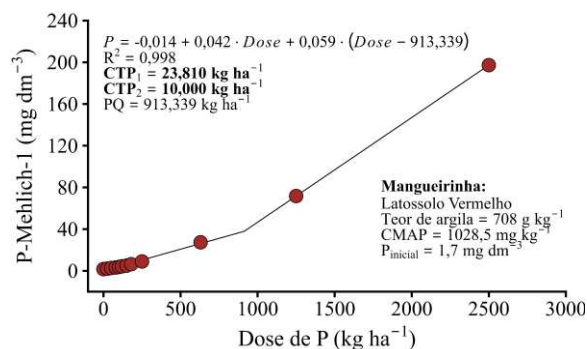
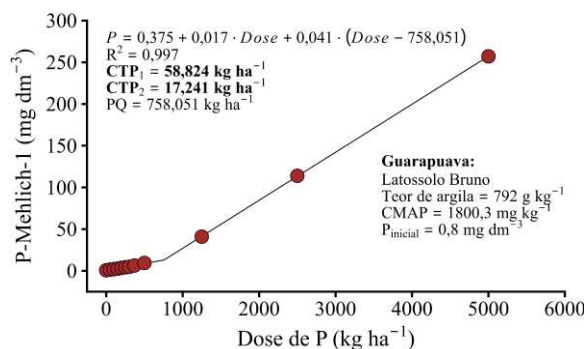
Por outro lado, para alguns solos o modelo de regressão segmentada não identificou um ponto de quebra estatisticamente definido, conforme indicado pela ausência de convergência (Apêndices 16, 31 e 32). Esse comportamento indica resposta linear da variável às doses aplicadas, sem evidência de mudança de comportamento no intervalo de doses avaliados (Gráfico 2).

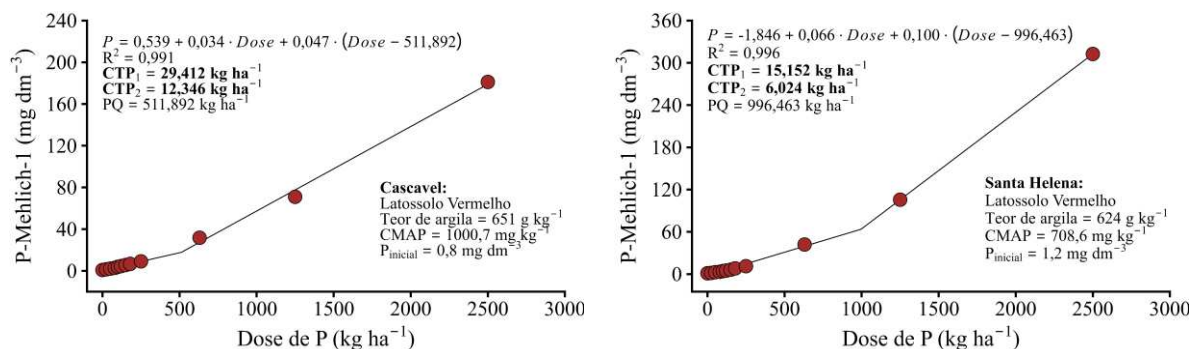
As capacidades de tamponamento de P ( $CTP_1$ ) variaram de 2,557 kg de P  $ha^{-1}$  (Loanda) a 58,824 kg de P  $ha^{-1}$  (Guarapuava). As mudanças de inclinação foram mais pronunciadas em solos argilosos, com redução média da  $CTP_1$  em torno de 15 kg de P  $ha^{-1}$ , enquanto em solos mais arenosos as reduções foram da ordem de 3 kg de P  $ha^{-1}$  (Apêndice 44). Esse comportamento indica a ocorrência de diminuição na quantidade de P necessária para elevar o teor do nutriente no solo, especialmente em solos com maior teor de argila.

Os pontos de quebra (PQ) apresentaram ampla variação em função do teor de argila, com variação média da ordem de 200 kg de P  $ha^{-1}$  em solos mais arenosos e em torno de 870 kg de P  $ha^{-1}$  em solos argilosos (Apêndice 46).



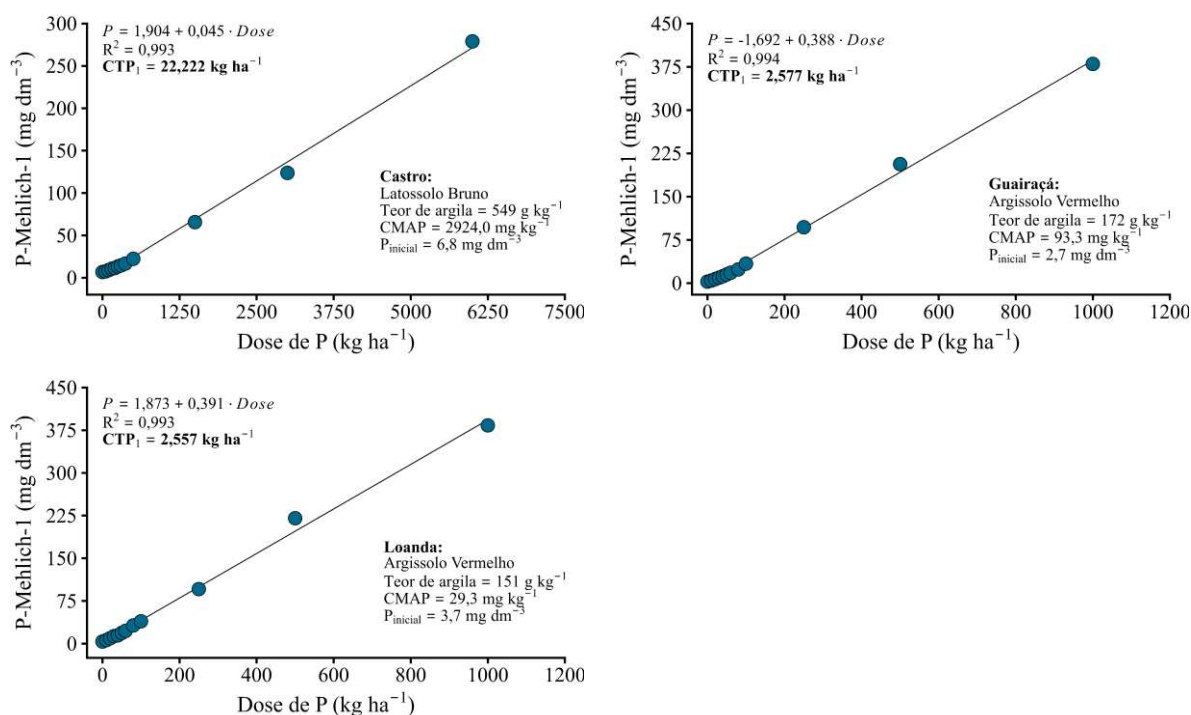






**Gráfico 1.** Ajuste de regressões lineares segmentadas entre os teores de P recuperados por Mehlich-1 e as doses de P adicionadas, após 20 dias de incubação, em solos coletados no estado do Paraná. CTP<sub>1</sub> e CTP<sub>2</sub> em kg de P ha<sup>-1</sup>.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.



**Gráfico 2.** Remodelagem das relações dose-resposta por regressões lineares simples entre os teores de P recuperados por Mehlich-1 e as doses de P adicionadas, após 20 dias de incubação, em solos do Paraná. CTP<sub>1</sub> em kg de P ha<sup>-1</sup>.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

## 6.2 Análise de correlação

O alto grau de correlação entre a CMAP e o Prem (-0,92\*\*\*) era esperado, uma vez que o Prem, em certa medida, pode ser considerado um dos pontos dentre os utilizados no ajuste

pela isoterma de Langmuir (Gráfico 3). Não obstante, para fins de predição da CMAP em função do Prem, o modelo matemático empírico ajustado por meio de regressão não linear pode ser considerado válido, apresentando coerência com o comportamento esperado e evidência satisfatório ajuste visual aos dados experimentais (Apêndice 9).

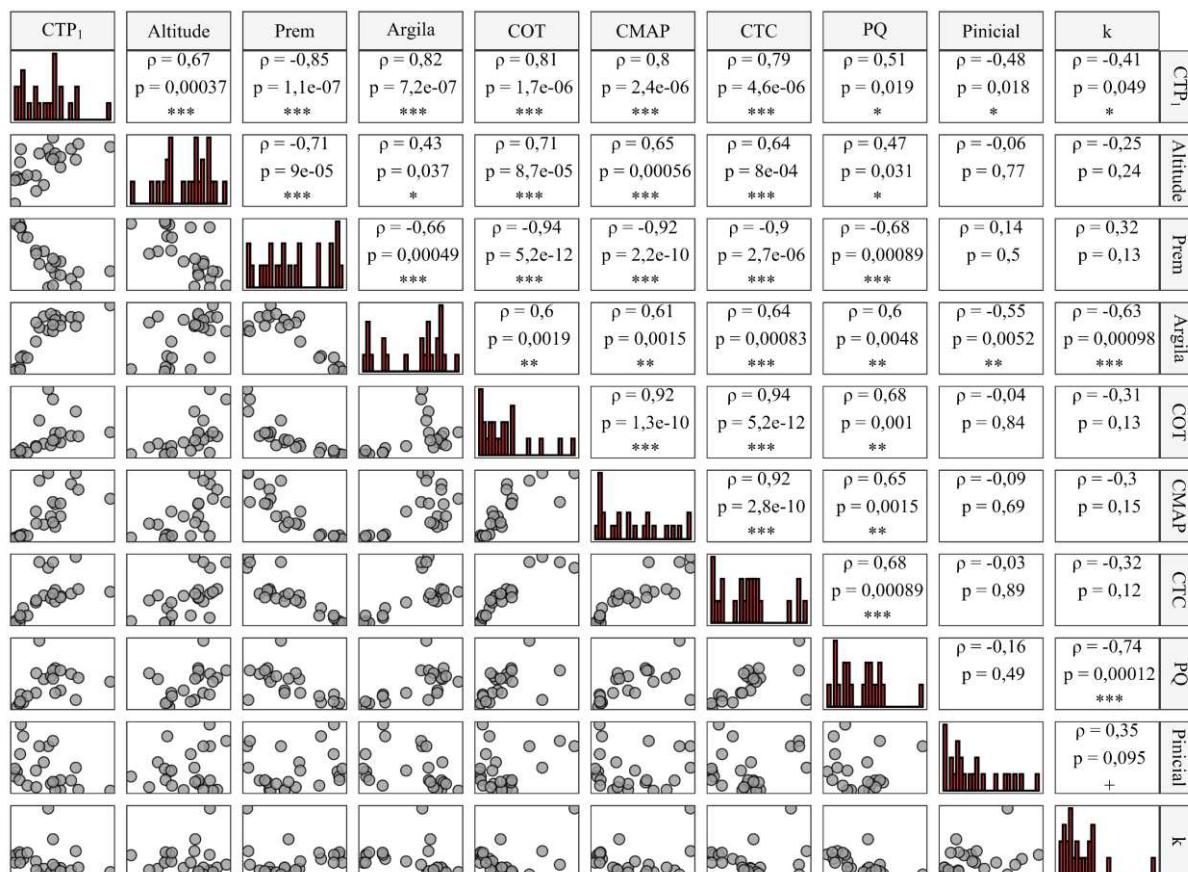
As correlações entre os indicadores diretos da capacidade de sorção de P, CMAP e Prem ( $0,61^{**}$  e  $-0,66^{***}$ ), com o teor de argila indicam sensibilidade moderada entre as variáveis (Gráfico 3).

O forte grau de correlação da CMAP e Prem ( $0,92^{***}$  e  $-0,94^{***}$ ) com o COT indica que a capacidade de sorção de P nos solos estudados depende fortemente desse atributo, possivelmente em razão da matéria orgânica atuar como fonte adicional de sítios de adsorção. Entretanto, parte dessa associação pode refletir uma correlação indireta entre o COT e o teor de argila ( $0,60^{**}$ ), uma vez que solos argilosos tendem a acumular maiores teores de matéria orgânica. Ainda nesse contexto, as correlações positivas entre o teor de argila ( $0,6^{**}$ ) e o COT ( $0,68^{**}$ ) com o PQ indicam que, em certo grau, o aumento desses atributos amplia a densidade de sítios de adsorção de P, refletindo a ampliação do “reservatório” de superfícies reativas no solo (Gráfico 3).

As associações entre CMAP e Prem ( $0,65^{***}$  e  $-0,71^{***}$ ) com a altitude, demonstram que solos localizados em regiões mais altas tendem a apresentar maior capacidade de sorção de P. Essa associação pode ser, ao menos em parte, de natureza indireta, uma vez que solos localizados em altitudes maiores tendem a acumular maior teor de COT ( $0,71^{***}$ ), com prováveis reflexos também em diferenças de ordem mineralógica (Gráfico 3).

A CTP<sub>1</sub> apresentou maiores correlações com Prem ( $-0,85^{***}$ ), argila ( $0,82^{***}$ ), COT ( $0,81^{***}$ ) CMAP ( $0,80^{***}$ ) e CTC ( $0,79^{***}$ ). As correlações com COT ( $0,6^{**}$ ) e CTC ( $0,64^{***}$ ) refletem, em grande parte, uma associação indireta com o teor de argila. Adicionalmente, a elevada correlação entre o COT e a CTC ( $0,94^{***}$ ) evidencia o papel central da participação da MOS no aumento da CTC nos solos analisados (Gráfico 3).

As correlações relacionadas à energia de ligação ( $k$ ) do modelo de Langmuir apresentaram - se inconsistentes. Dessa forma, a interpretação desse parâmetro foi tomada como sendo puramente matemática, sem significado físico (Gráfico 3).



**Gráfico 3.** Matriz de correlação de Spearman das propriedades dos solos na camada 0-20cm em solos de mata, coletados no estado do Paraná.

Nível de significância: + $p < 0,10$ , \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$ . Outliers: Bandeirantes e Tapira.

**Fonte:** Elaboração do autor, 2026.

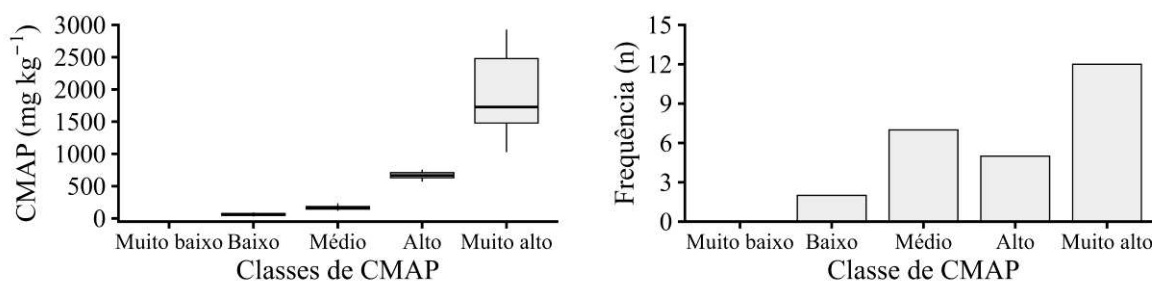
### 6.3 Análise exploratória: agrupamento das capacidades de tamponamento de fósforo e capacidades máximas de adsorção de fósforo

Os resultados obtidos em solos coletados em áreas de mata adjacentes às áreas de cultivo indicam que grande parte das culturas implantadas no estado do Paraná está situada em solos de alta capacidade de adsorção de P (CMAP) e teores de argila superiores a  $400 \text{ g kg}^{-1}$  (Gráficos 4 e 5; Tabelas 6 e 7). Apesar da amostragem não ter seguido um delineamento totalmente aleatorizado, os padrões observados encontram respaldo na literatura, descrevendo a predominância de solos intemperizados no estado do Paraná.

Solos com teores de argila superiores a  $400 \text{ g kg}^{-1}$  apresentaram variabilidade maior nos valores de CTP<sub>1</sub> (Gráfico 5 e Tabela 7). Os solos de Tapira e Guarapuava foram identificados como valores discrepantes (*outliers*), de acordo com os limites estabelecidos pelo método

interquartílico (IQR) (Gráfico 5). O solo de Bandeirantes, embora não identificado como outlier pelo método IQR, apresentou valor de CTP<sub>1</sub> atípico frente a solos com teores de argila semelhantes, possivelmente refletindo interferências antrópicas associadas à coleta próxima a uma área de circulação de pessoas e animais domésticos (Gráfico 1).

Não obstante, a coloração levemente acinzentada observada no solo de Tapira sugere a presença de condições hidromórficas. O solo de Guarapuava apresentou coloração brunada, típica de ambientes bem drenados e relacionada à predominância de goethita. O solo de Bandeirantes, por sua vez, exibiu coloração avermelhada, indicativa da predominância de hematita (Apêndice 1).



**Gráfico 4.** Agrupamento dos valores de CMAP e frequência de ocorrência dos solos coletados no estado do Paraná, de acordo com a classificação proposta por Juo e Fox (1977).

Muito baixo (<10 mg kg<sup>-1</sup>), baixo (10-100 mg kg<sup>-1</sup>), médio (100-500 mg kg<sup>-1</sup>), alto (500-1000 mg kg<sup>-1</sup>) e muito alto (>1000 mg kg<sup>-1</sup>).

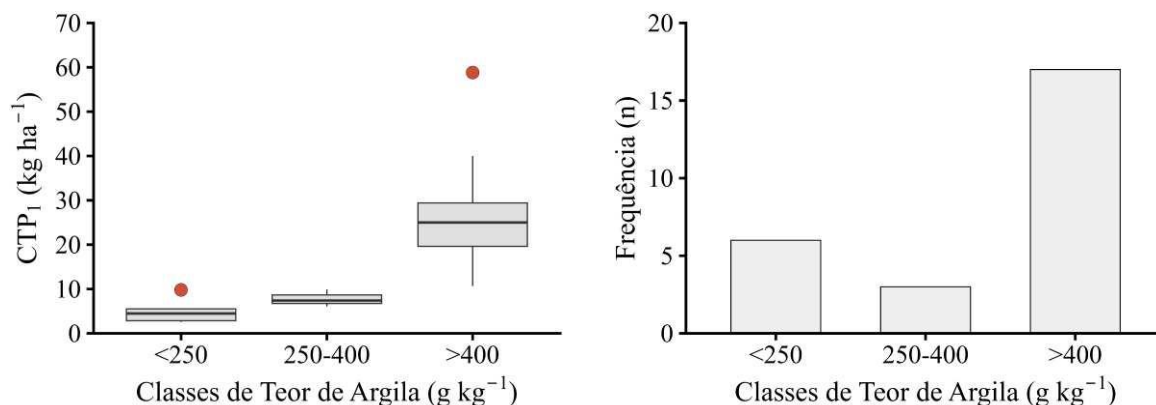
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Tabela 6.** Análise exploratória: variabilidade da capacidade máxima de adsorção de fósforo em classes de capacidade de adsorção.

| <sup>(4)</sup> Classes<br>mg kg <sup>-1</sup> | CMAP                 |                     |         |      |      |      | <sup>(2)</sup> A | <sup>(3)</sup> DP |
|-----------------------------------------------|----------------------|---------------------|---------|------|------|------|------------------|-------------------|
|                                               | <sup>(1)</sup> Freq. | Média               | Mediana | Mín. | Máx. |      |                  |                   |
|                                               |                      | mg kg <sup>-1</sup> |         |      |      |      |                  |                   |
| M. baixo                                      | 0                    | ----                | ----    | ---- | ---- | ---- | ----             | ----              |
| Baixo                                         | 2                    | 61,1                | 61,1    | 29   | 91,3 | 64,3 | 45,5             |                   |
| Médio                                         | 7                    | 168                 | 167     | 117  | 235  | 118  | 39,3             |                   |
| Alto                                          | 5                    | 667                 | 667     | 571  | 758  | 187  | 71,8             |                   |
| M. alto                                       | 12                   | 1916                | 1728    | 1028 | 2929 | 1901 | 688              |                   |

CMAP em mg de P kg<sup>-1</sup>. <sup>(1)</sup> Frequência de ocorrência. <sup>(2)</sup> Amplitude. <sup>(3)</sup> Desvio padrão amostral. <sup>(4)</sup> Classes: Muito baixo (<10 mg kg<sup>-1</sup>), baixo (10-100 mg kg<sup>-1</sup>), médio (100-500 mg kg<sup>-1</sup>), alto (500-1000 mg kg<sup>-1</sup>) e muito alto (>1000 mg kg<sup>-1</sup>), conforme Juo e Fox (1977).

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.



**Gráfico 5.** Agrupamento dos valores de capacidade de tamponamento de fósforo (CTP<sub>1</sub>) de acordo com as classes de argila, determinadas conforme a SBCS/NEPAR (2019), e frequência de ocorrência.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Tabela 7.** Análise exploratória: variabilidade da capacidade de tamponamento de fósforo em função das classes de teor de argila.

| <sup>(4)</sup> Classes<br>g kg <sup>-1</sup> | CTP <sub>1</sub>     |        |         |        |        |  | <sup>(2)</sup> A | <sup>(3)</sup> DP |
|----------------------------------------------|----------------------|--------|---------|--------|--------|--|------------------|-------------------|
|                                              | <sup>(1)</sup> Freq. | Média  | Mediana | Mín.   | Máx.   |  |                  |                   |
| <250                                         | 6                    | 4,920  | 4,483   | 2,557  | 9,804  |  | 7,247            | 2,721             |
| 250-400                                      | 3                    | 7,790  | 7,407   | 6,061  | 9,901  |  | 3,840            | 1,948             |
| >400                                         | 17                   | 26,927 | 25,000  | 10,638 | 58,824 |  | 48,186           | 11,547            |

CTP<sub>1</sub> em kg de P ha<sup>-1</sup>. <sup>(1)</sup> Frequência de ocorrência. <sup>(2)</sup> Amplitude. <sup>(3)</sup> Desvio padrão amostral. <sup>(4)</sup> Classes de argila determinadas conforme a SBCS/NEPAR (2019).

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

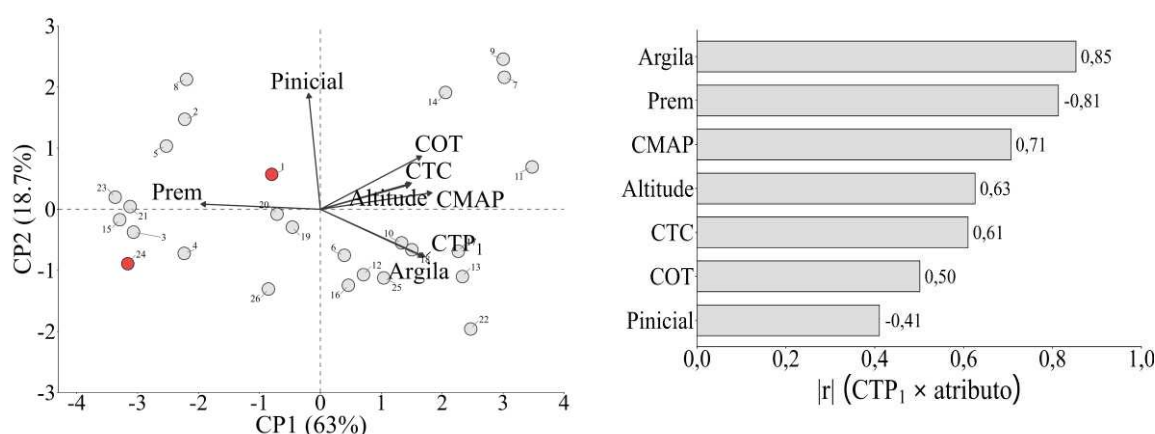
#### 6.4 Seleção de preditores para estimativa da capacidade tamponamento de fósforo

A CTP<sub>1</sub> está fortemente correlacionada com atributos químicos e físico dos solos. As maiores correlações absolutas foram observadas para o teor de argila ( $r=0,85$ ), P remanescente ( $r=-0,81$ ) e CMAP ( $r=0,71$ ), assumindo uma relação linear entre as variáveis. O alinhamento entre a CTP<sub>1</sub> e os vetores do teor de argila e do Prem no *biplot* indica associação positiva com o teor de argila e negativa com o P rem, sugerindo que ambas as variáveis contribuem de forma expressiva para a explicação da variabilidade da CTP<sub>1</sub> (Gráfico 6).

A CMAP, altitude, COT e CTC exibiram vetores alinhados na mesma direção e ângulos reduzidos (Gráfico 6). Isso sugere que parte da variabilidade explicada por uma das variáveis também pode ser representada por outra. Utilizar essas variáveis no mesmo modelo pode gerar

informações redundantes, além de gerar dificuldade de convergência no modelo de regressão múltipla.

A CMAP e Prem são parâmetros altamente correlacionados ( $0,92^{***}$ ) (Gráfico 3), refletindo a mesma base fenomenológica relacionada à capacidade de adsorção de P. Entretanto, o Prem apresenta maior praticidade operacional em sua determinação, tornando-o um preditor mais acessível e aplicável para fins de modelagem. Dessa forma, o teor de argila e o Prem destacam-se como preditores consistentes da  $CTP_1$ , refletindo, respectivamente, uma base quantitativa relacionada ao aumento de partículas ativas capazes de reter o fósforo e uma base que, em certa medida, capta efeitos qualitativos associados à mineralogia da fração argila.



**Gráfico 6.** Análise de componentes principais e correlação de Pearson. Pontos marcados em vermelho foram tomados como outliers.

Outliers: Bandeirantes e Tapira.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

## 6.5 Modelos matemáticos para predição da capacidade de tamponamento de fósforo

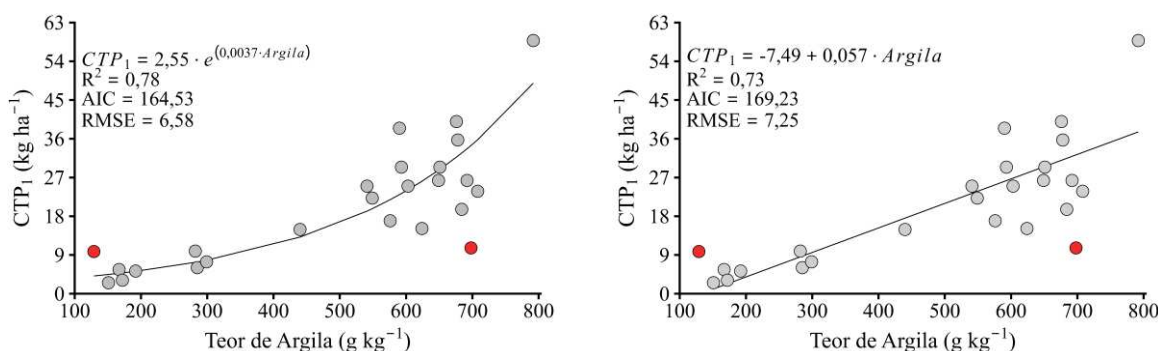
Na modelagem matemática, o solo de Guarapuava foi mantido por apresentar teores de argila elevados, permitindo explorar toda a faixa de  $CTP_1$  sem excluir informações representativas.

Entre os quatro modelos bidimensionais avaliados, o modelo exponencial apresentou os menores valores de AIC e RMSE quando a argila foi utilizada como variável preditora, enquanto o modelo linear simples apresentou melhor desempenho para o Prem (Gráficos 7 e 8). Não obstante, a ocorrência de valores negativos de  $CTP_1$  em modelos lineares pode ser considerada uma limitação matemática, refletindo uma relação não fenomenológica com o parâmetro estudado.

Para fins de utilização de um único preditor para a  $CTP_1$ , o teor de argila apresentou melhor ajuste global ( $R^2$ ) em relação aos pontos observados. O modelo exponencial apresentou melhores desempenhos segundo os critérios AIC e RMSE em relação ao modelo linear. A manutenção dos possíveis outliers no ajuste dos modelos baseados no Prem visou preservar a consistência da modelagem, apesar da presença de pontos discrepantes, especialmente o solo de Guarapuava. A escolha da argila como preditor principal também se justifica pela ausência de níveis críticos estabelecidos com base no Prem para o estado do Paraná.

Dentre os modelos avaliados, o modelo tridimensional apresentou menor erro de predição (RMSE = 5,39). A inclusão do segundo preditor (Prem), resultou em substancial melhora do ajuste do modelo, conforme observado pela redução AIC, indicando que o ganho de ajuste superou a penalização associada ao aumento da complexidade do modelo de regressão múltipla (Gráfico 9).

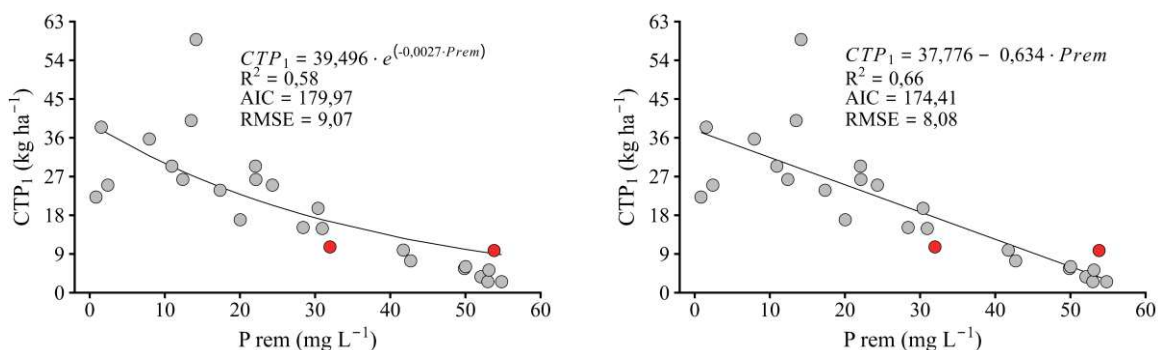
A projeção bidimensional da superfície de resposta ajustada evidencia que solos com maior teor de argila apresentam maior sensibilidade às variações de Prem, sugerindo que a mineralogia da fração argila exerce influência relevante sobre a  $CTP_1$  (Gráfico 9).



**Gráfico 7.** Modelos matemáticos para a predição da  $CTP_1$  em função do teor de argila. Pontos marcados em vermelho foram tomados como outliers.

Outliers: Bandeirantes e Tapira.

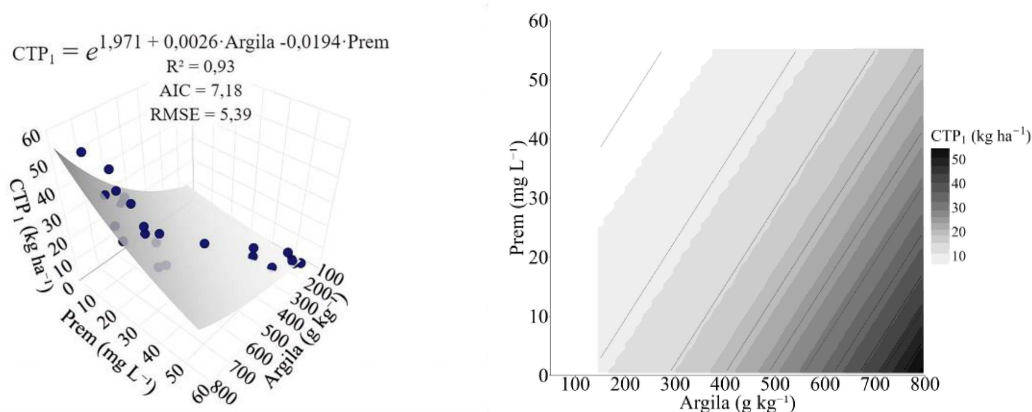
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.



**Gráfico 8.** Modelos matemáticos para a predição da CTP<sub>1</sub> em função do P remanescente. Pontos marcados em vermelho foram tomados como outliers.

Outliers: Bandeirantes e Tapira.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.



**Gráfico 9.** Modelo matemático para a predição da CTP<sub>1</sub> em função do teor de argila e do fósforo remanescente (Prem), com projeção bidimensional do plano de resposta.

Outliers: Bandeirantes e Tapira.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

## 6.6 Tabelas de para determinação da capacidade de tamponamento em função do teor de argila

A CTP<sub>1</sub> estimada pelo agrupamento dos valores em classes de argila variaram de 9,02 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> em solos arenosos a 59,29 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> em solos argilosos (Tabela 8). A exclusão dos outliers para a elaboração da Tabela 8 baseou-se no fato da alta sensibilidade das médias a valores extremos. Valores gerados a partir do modelo exponencial indicam que pode ocorrer estratificação mais acentuada da CTP<sub>1</sub>, especialmente entre 400 e 550 g kg<sup>-1</sup> de argila (Tabela 9).

Em contrapartida, as capacidades de tamponamento estimadas a partir do NEPAR/SBCS (2019) variaram de 5,92 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> em solos com teores de argila inferiores a 250 g kg<sup>-1</sup> a 11,84 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> em solos com teores argila superiores a 400 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. Valores substancialmente menores as encontradas por meio da incubação dos solos do estado do Paraná e as propostas para a região do Cerrado (Gráfico 10).

**Tabela 8.** Valores de CTP<sub>1</sub> em função das classes de argila para a recomendação de adubação fosfatada corretiva obtida pelo agrupamento dos valores observados.

| <sup>(1)</sup> Classes de argila | <sup>(2)</sup> N <sub>c</sub> | <sup>(3)</sup> CTP <sub>1</sub> | <sup>(4)</sup> CTP <sub>1</sub>                                     |
|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| g kg <sup>-1</sup>               | mg de P dm <sup>-3</sup>      | kg de P ha <sup>-1</sup>        | <sup>(*)</sup> kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> |
| <250                             | 18                            | 3,94                            | 9,02                                                                |
| 250-400                          | 12                            | 7,79                            | 17,84                                                               |
| >400                             | 9                             | 25,89                           | 59,29                                                               |

<sup>(1)(2)</sup> Classes de argila e nível crítico de fósforo, conforme a SBCS/NEPAR (2019). <sup>(3)(4)</sup> Valores de médios CTP<sub>1</sub>: necessidade, em kg de P ha<sup>-1</sup> ou kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, para elevar em 1 mg dm<sup>-3</sup> a quantidade de P recuperada pelo extrator Mehlich-1, considerando a camada de correção de 0 a 20 cm de profundidade. <sup>(\*)</sup> Fator de conversão de P para P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 2,29. \*\* Valores de CTP<sub>1</sub> de Bandeirantes, Tapira e Guarapuava foram tomados como outliers.

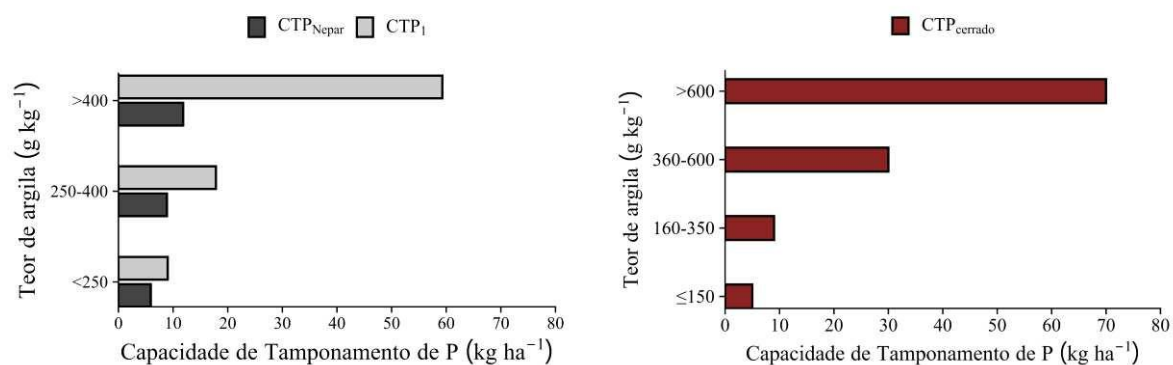
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Tabela 9.** Valores de CTP<sub>1</sub> em função das classes de argila para a recomendação de adubação fosfatada corretiva obtida por meio do modelo exponencial ajustado em função do teor de argila.

| <sup>(1)</sup> Classes de argila | <sup>(3)</sup> CTP <sub>1</sub> | <sup>(4)</sup> CTP <sub>1</sub>                                     |
|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| g kg <sup>-1</sup>               | kg de P ha <sup>-1</sup>        | <sup>(*)</sup> kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> |
| 100 – 150                        | 4,1                             | 9,4                                                                 |
| 160 – 200                        | 5,0                             | 11,4                                                                |
| 210 – 250                        | 6,0                             | 13,7                                                                |
| 260 – 300                        | 7,3                             | 16,7                                                                |
| 310 – 350                        | 8,7                             | 19,9                                                                |
| 360 – 400                        | 10,5                            | 24,0                                                                |
| 410 – 450                        | 12,7                            | 29,0                                                                |
| 460 – 500                        | 15,3                            | 35,0                                                                |
| 510 – 550                        | 18,4                            | 42,1                                                                |
| 560 – 600                        | 22,2                            | 50,8                                                                |
| 610 – 650                        | 26,8                            | 61,4                                                                |
| 660 – 700                        | 32,3                            | 74,0                                                                |

<sup>(1)</sup> Classes de argila, conforme Sousa *et al.* (2016). <sup>(2)(3)</sup> Valores de CTP<sub>1</sub>: necessidade, em kg de P ha<sup>-1</sup> ou kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, para elevar em 1 mg dm<sup>-3</sup> a quantidade de P recuperada pelo extrator Mehlich-1, considerando a camada de correção de 0 a 20 cm de profundidade. <sup>(\*)</sup> Fator de conversão de P para P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 2,29.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.



**Gráfico 10.** Comparação entre os valores das capacidades de tamponamento de P do NEPAR/SBCS (2019), determinadas conforme Duarte *et al.* (2026), e as estimadas por meio do agrupamento dentro das classes de argila, em kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>(esquerda). Capacidade de Tamponamento de P proposta por Sousa, Lobato e Rein (2006) para a região do Cerrado, em kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> (direita).

## 6.7 Tabelas de para determinação da capacidade de tamponamento em função do Fósforo Remanescente

Os valores de CTP<sub>1</sub> variaram de 6,6 a 80,6 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> (Tabela 10). Embora a relação com o Prem tenha apresentado coeficiente de correlação ligeiramente superior ao observado para o teor de argila (-0,85\*\*\*) (Gráfico 3), o uso do teor de argila como variável preditora da CTP<sub>1</sub> resultou em menor erro de predição (RMSE) (Gráfico 7).

**Tabela 10.** Valores de CTP<sub>1</sub> em função das classes de P remanescente para a recomendação de adubação fosfatada corretiva obtida por meio do modelo linear ajustado em função do P remanescente.

| <sup>(1)</sup> Classes de Prem<br>mg L <sup>-1</sup> | <sup>(3)</sup> CTP <sub>1</sub><br>kg de P ha <sup>-1</sup> | <sup>(4)</sup> CTP <sub>1</sub><br><sup>(*)</sup> kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0 – 8                                                | 35,2                                                        | 80,6                                                                                                   |
| 9 – 18                                               | 29,2                                                        | 66,9                                                                                                   |
| 19 – 28                                              | 22,9                                                        | 52,4                                                                                                   |
| 29 – 39                                              | 16,2                                                        | 37,1                                                                                                   |
| 40 – 49                                              | 9,6                                                         | 21,9                                                                                                   |
| 50 – 60                                              | 2,9                                                         | 6,6                                                                                                    |

<sup>(1)</sup> Classes de Prem, adaptado de Alvarez *et al.* (2000). <sup>(2)(3)</sup> Valores de CTP<sub>1</sub>: necessidade, em kg de P ha<sup>-1</sup> ou kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, para elevar em 1 mg dm<sup>-3</sup> a quantidade de P recuperada pelo extrator Mehlich-1, considerando a camada de correção de 0 a 20 cm de profundidade. <sup>(\*)</sup> Fator de conversão de P para P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 2,29.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

## 6.8 Ajustes nas doses de adubação corretiva total para solos do estado do Paraná

A Tabela 11 foi construída a partir de uma adaptação da tabela apresentada por Mumbach (2021). As doses foram calculadas a partir da utilização dos valores de CTP<sub>1</sub> estimados a partir do agrupamento dos valores observados (Tabela 8) e da equação modificada proposta por Sousa, Lobato e Rein, 2006.

A construção do Gráfico 11 teve como base de dados os valores estimados na Tabela 11 e os apresentados pela SBCS/NEPAR (2019). A simulação das doses revela maiores discrepâncias nas quantidades de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> requeridas em solos com mais de 400 g kg<sup>-1</sup> de argila, especialmente nas classes muito baixa e baixa. Em solos argilosos com disponibilidade de P classificada como muito baixa, as doses necessárias para atingir o Nc situam-se em torno de 450 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, valores substancialmente superiores àqueles estimados com base nas recomendações do SBCS/NEPAR (2019). Por outro lado, em solos com teores de argila inferiores a 250 g kg<sup>-1</sup>, as doses requeridas são da ordem de 135 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, enquanto solos com teores intermediários de argila (250 a 400 g kg<sup>-1</sup>) demandam aproximadamente 170 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Gráfico 11).

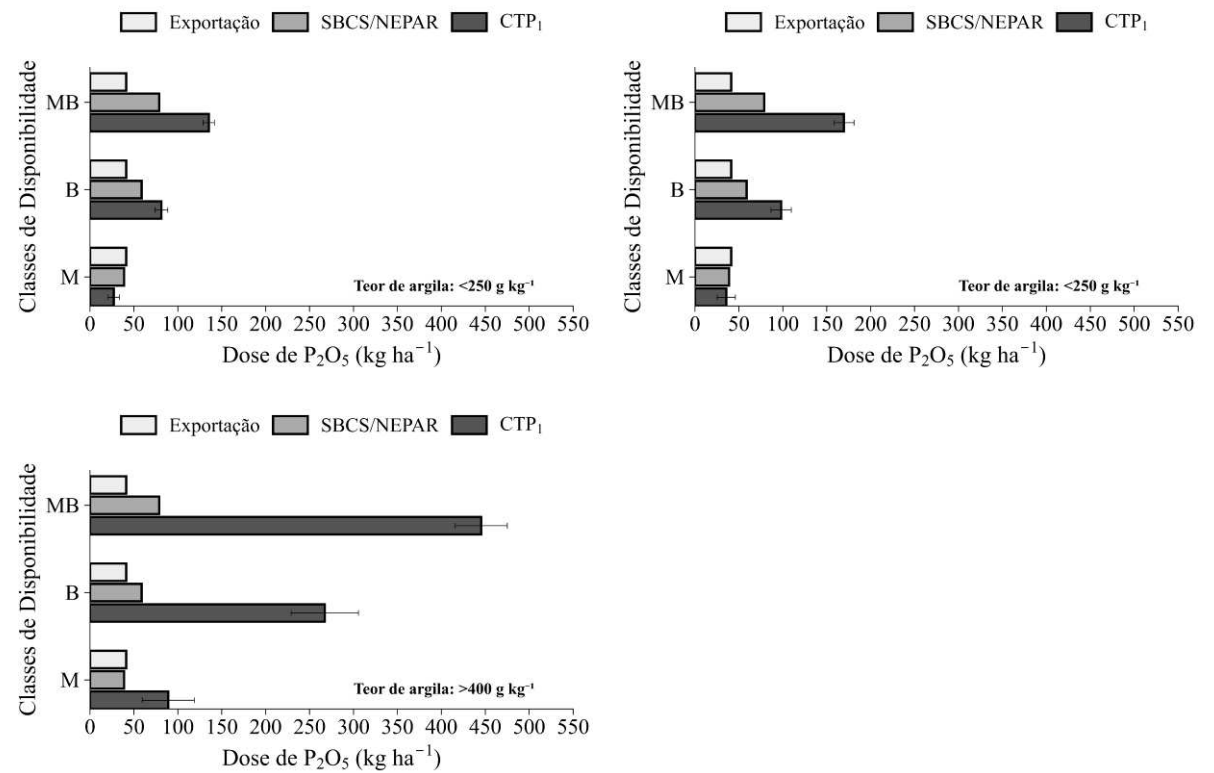
**Tabela 11.** Doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para a adubação fosfatada corretiva total em função dos teores de argila.

| P melich-1<br>mg dm <sup>-3</sup> | Teor de argila (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>(5)</sup> |         |        |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------|---------|--------|
|                                   | <250                                                | 250-400 | >400   |
| 1                                 | 153,34                                              | 196,24  | 475,12 |
| 2                                 | 144,32                                              | 178,4   | 415,73 |
| 3                                 | 135,3                                               | 160,56  | 356,34 |
| 4                                 | 126,28                                              | 142,72  | 296,95 |
| 5                                 | 117,26                                              | 124,88  | 237,56 |
| 6                                 | 108,24                                              | 107,04  | 178,17 |
| 7                                 | 99,22                                               | 89,2    | 118,78 |
| 8                                 | 90,2                                                | 71,36   | 59,39  |

|                   |                         |          |          |
|-------------------|-------------------------|----------|----------|
| 9 <sup>(2)</sup>  | 81,18                   | 53,52    | <b>M</b> |
| 10                | 72,16                   | 35,68    |          |
| 11                | 63,14                   | 17,84    |          |
| 12 <sup>(3)</sup> | 54,12                   | <b>M</b> |          |
| 13                | 45,1                    |          |          |
| 14                | 36,08                   |          |          |
| 15                | 27,06                   |          |          |
| 16                | 18,04                   |          |          |
| 17                | 9,02                    |          |          |
| 18 <sup>(4)</sup> | <b>M</b> <sup>(1)</sup> |          |          |

<sup>(1)</sup>**M**: Realizar a adubação de manutenção em função da espécie e rendimento pretendido. <sup>(2)(3)(4)(5)</sup> Níveis críticos e classes de argila, conforme o SBCS/NEPAR (2019).

**Fonte:** Elaboração do autor (2025).



**Gráfico 11.** Comparação entre os valores estimados a partir do agrupamento das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dentro das classes de disponibilidade de P, e as doses de fósforo recomendadas para a cultura da soja, considerando uma expectativa de produtividade de 4 t ha<sup>-1</sup>, conforme a SBCS/NEPAR (2019).

Classe de Disponibilidade de P: MB: muito baixo; B: baixo; M: médio. Exportação: Quantidade de  $P_2O_5$  exportada em 4t de grãos de soja. SBRS/NEPAR: Doses estimadas de adubação de correção “implícitas”. CTP<sub>1</sub>: Doses de  $P_2O_5$  para atingir o  $N_c$ .

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

## 7 DISCUSSÃO

### 7.1 Capacidade de tamponamento de fósforo e parâmetros relacionados

As alterações das capacidades de tamponamento de P (CTP) refletem modificações acentuadas na dinâmica do P lábil sob condições de adubação fosfatada, especialmente em solos argilosos (Gráfico 1). A redução da capacidade de tamponamento de P possui implicações práticas na redução da necessidade de adubação fosfatada para aumentar a disponibilidade de P às plantas (Roy *et al.*, 2018; Barrow e Debnath, 2018). Essa redução pode ser explicada pela neutralização progressiva dos sítios de sorção de maior afinidade, à medida que são ocupados pelo P proveniente da fertilização (Barrow e Debnath, 2014). Solos de textura arenosa, devido ao reduzido número de sítios de sorção, apresentaram, de modo geral, baixa ou nenhuma mudança expressiva na capacidade de tamponamento, em valores absolutos (Gráficos 1 e 2).

Em solos incubados dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, a capacidade de tamponamento de P apresentou ampla variação em função da textura do solo. Em classes com teor de argila inferior a 20%, os valores reportados situaram-se entre 7,85 (Mumbach *et al.*, 2021) e 23 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> (Rogeri, 2013). Em contraste, solos com teor de argila superior a 60% apresentaram capacidades de tamponamento substancialmente mais elevadas, variando de 48,35 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> (Mumbach *et al.*, 2021) a 65,1 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> (Rogeri, 2013), refletindo a maior participação de superfícies reativas na retenção do nutriente.

Para solos de textura intermediária (21–40% de argila), observaram-se valores semelhantes entre os estudos, da ordem de 17,9 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> (Rogeri, 2013) e 18 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> (Mumbach *et al.*, 2021), enquanto em solos com teores de argila entre 40% e 60% os valores se elevaram para a faixa de 41,5 (Rogeri, 2013) a 42,63 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> (Mumbach *et al.*, 2021). Em ensaios conduzidos em condições de campo na região do Cerrado, a capacidade de tamponamento de P também apresentou grande amplitude em função da textura do solo, variando de 5 kg de kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> em solos arenosos até 70 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> em solos argilosos (Sousa, Lobato e Rein, 2006; Sousa *et al.*, 2016).

Na presente investigação, as capacidades de tamponamento de P estimadas variaram de 9,02 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> em solos com teor argila menor que 25% a 59, 29 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> em solos com mais de 40% de argila (Tabela 8). Esses resultados, em certa medida, se aproximam dos valores reportados por Rogeri (2013) e Mumbach *et al.* (2021) nos estados de SC e RS, bem como por Sousa *et al.* (2016) na região do Cerrado.

Entretanto, há registros de solos de textura média e altos teores de MOS que apresentaram capacidades de tamponamento próximas a 100 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> e 120 de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> (Grando *et al.*, 2024), indicando que, embora a textura exerça papel central, outros atributos mineralógicos e químicos do solo podem intensificar a retenção de fósforo para além do esperado apenas com base no teor de argila.

Solos mais argilosos são caracterizados por apresentar maior quantidade de óxidos e hidróxidos de Fe e Al e caulinita, elementos responsáveis pelo aumento da sua capacidade de retenção de P (Rheinheimer *et al.*, 2008). Embora a CTP<sub>1</sub> tenha apresentado correlação altamente significativa com o teor de argila ( $\rho = 0,82^{***}$ ) (Gráfico 3), solos com teores de argila semelhantes podem exibir capacidades de tamponamento consideravelmente distintas, evidenciando o efeito do caráter qualitativo da fração argila na modulação da intensidade desse parâmetro. A maior variabilidade da CTP<sub>1</sub> observada em solos mais argilosos sugere que a mineralogia da fração argila pode exercer papel relevante na capacidade de retenção de P (Gráfico 5).

A CTP<sub>1</sub> apresentou alta correlação com Prem ( $\rho = -0,85^{***}$ ), demonstrando também boa sensibilidade como indicador da capacidade de tamponamento. Rogeri *et al.* (2016) observaram que o Prem apresenta correlações mais consistentes com atributos mineralógicos associados à retenção de P, como teores de Fe e Al pedogênicos extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato (DBC) e o Fe de baixa cristalinidade, ao passo que o teor de argila apresenta correlação restrita com Fe extraído por DCB. Embora, no contexto da capacidade de predição dos modelos matemáticos, a utilização conjunta desses preditores mostrou-se mais adequada, uma vez que a inclusão do Prem complementa a capacidade explicativa do modelo ao incorporar informações de natureza qualitativa da fração argila (Gráfico 9).

A correlação da CTP<sub>1</sub> com o COT ( $\rho = 0,81^{***}$ ) sugere, a princípio, uma relação causal direta com o aumento da capacidade de retenção de P. Entretanto, os efeitos do COT, principal componente da MOS, podem refletir indiretamente a associação com solos mais argilosos ( $\rho=0,6^{**}$ ). A fração argila exerce influência na conservação da MOS ao fornecer sítios de reação para interações organo-minerais e favorecer a formação de microagregados. A

estabilização química e física da matéria orgânica nessas estruturas reduz sua acessibilidade aos microrganismos, diminuindo a taxa de decomposição (Pillon; Mielniczuk; Martin Neto, 2002).

Por outro lado, a MOS pode provocar alterações de ordem mineralógica. A presença de óxidos de Fe, especialmente em solos formados em topografias mais elevadas e com maior acúmulo de matéria orgânica, geralmente apresenta maiores teores de goethita (Bortoluzzi *et al.*, 2015), caracterizada por sua maior área superficial específica frente a hematita (Goldberg, Forster e Godfrey, 1996). A MOS pode inibir indiretamente a cristalização de Fe, promovendo a formação de formas pedogênicas menos cristalinas, com maior área superficial específica (Bortoluzzi *et al.*, 2015; Mabagalaa e Mng'ong'o, 2022), resultando em maior CTP, mesmo em solos com teores semelhantes ou ligeiramente inferiores de argila. Adicionalmente, por mecanismos distintos daqueles relacionados à cristalização dos óxidos de Fe, a MOS também pode contribuir diretamente para o aumento da CTP dos solos. Tais elevações, em grande medida, estão associados ao caráter aniônico da MOS que, por meio da formação de pontes de cátions (Sanyal e De Datta, 1991), envolvendo cátions como Al, Fe e Ca previamente adsorvidos à sua estrutura, passam a atuar como sítios de retenção de P (Novais e Smyth, 1999).

Ademais, solos hidromórficos, frequentemente caracterizados pela coloração acinzentada (Teixeira, Macedo e Martins, 2009), podem apresentar flutuações nas condições redox devido à alternância entre inundação e drenagem periódicas. Essas oscilações favorecem a formação de compostos de ferro pouco cristalinos, que podem atuar como principais responsáveis pela retenção de P em períodos de drenagem (Ranno *et al.*, 2007). Esse comportamento pode explicar a superior capacidade de tamponamento de P do solo de Tapira, mesmo quando comparado a solos com teores de argila ligeiramente superiores (Gráfico 1).

A predição da CTP<sub>1</sub> por meio do modelo exponencial em função do teor de argila indica que pode ocorrer uma estratificação mais acentuada da capacidade de tamponamento entre 400 e 550 g kg<sup>-1</sup> de argila, embora ainda persistam incertezas quanto à intensidade dessa variação devido à escassez de amostras nessa faixa (Gráfico 7). Ainda assim, as predições apresentadas na Tabela 9 apontam para a necessidade de um detalhamento maior da CTP<sub>1</sub> nesse intervalo.

Por fim, em certo grau, as magnitudes da CTP<sub>1</sub> no estado do Paraná foram similares aos encontrados estados de SC e RS (Rogeri, 2013; Mumbach *et al.*, 2021) e na região do Cerrado (Sousa, Lobato e Rein, 2006; Sousa *et al.*, 2016), indicando uma harmonização dos valores estimados entre diferentes regiões edafoclimáticas, sugerindo que a CTP apresenta comportamento consistente, apesar da variação regional. O estabelecimento de critérios mínimos harmonizados pode reduzir discrepâncias nas recomendações de fósforo, além de aumentar a confiabilidade das recomendações e a eficiência de uso de P (Duarte *et al.*, 2026).

## 7.2 Adubação corretiva fosfatada com base na capacidade de tamponamento de fósforo

A determinação da capacidade de tamponamento de P, no presente ensaio, foi conduzida sob condições de maximização da exposição do P aos constituintes do solo, mediante a utilização de amostras previamente peneiradas, com a aplicação de P na forma de solução concentrada, considerando-se a camada de 0-20cm como referência de correção. Nesse sentido, a utilização da CTP<sub>1</sub> tende a ser mais coerente quando interpretada sob condições que se aproximem da metodologia empregada para sua determinação: a aplicação de uma fonte solúvel de P e sua incorporação na camada arável, visando maximizar a interação do P com a matriz do solo.

As doses máximas simuladas para a adubação fosfatada corretiva total, considerando a elevação do teor de P de 1 mg dm<sup>-3</sup> (Mehlich-1) até os níveis críticos estabelecidos pela SBCS/NEPAR (2019), variaram de 153,34 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> em solos com menos de 250 g kg<sup>-1</sup> de argila a 475,12 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> em solos com mais de 400 g kg<sup>-1</sup> (Tabela 10).

A magnitude dessas doses, em certa medida, encontra respaldo em resultados experimentais. Em solos do Cerrado com teores iniciais de P classificados como muito baixos, sobretudo em classes texturais mais argilosas, incrementos produtivos associados a efeitos residuais expressivos geralmente requerem adubações corretivas da ordem de 400 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> (Sousa *et al.*, 2016).

Em soja sob cultivo convencional, a aplicação de 400 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> por duas safras consecutivas (800 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> no total), a lance e incorporada à camada arável, promoveu incrementos produtivos e efeito residual significativo em Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso com baixo teor de P (2 mg dm<sup>-3</sup>, resina) (Oliveira Junior; Prochnow; Klepker, 2008). De forma semelhante, *Coffea arabica* cultivado sob irrigação em Latossolo Vermelho argiloso com baixo teor de P (3,3 mg dm<sup>-3</sup>, Mehlich-1) apresentou aumento de 138% na produtividade com a aplicação anual de 400 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> (Reis *et al.*, 2011).

Cabe destacar que, para solos argilosos, Sousa *et al.*, (2016) propuseram níveis críticos para culturas de baixo valor agregado substancialmente menores em solos com teores de argila superiores a 500 g kg<sup>-1</sup>, representando reduções de até 2,5 em relação ao valor estabelecido pela SBCS/NEPAR (2019). Esse detalhamento maior dos níveis críticos parte da premissa de que o extrator Mehlich-1 tem o poder de extração reduzido à medida que a acidez do solo se torna mais tamponada. Níveis críticos menores em solos com maiores poder de tamponamento corrigem a sensibilidade do extrator (Novais e Smyth, 1999).

Sob a perspectiva de níveis “adequados de P”, quando o teor de P encontra-se em seu nível crítico, as doses recomendadas variaram de 90 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> (Sousa *et al.*, 2016) a 110 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> (SBCS/NEPAR, 2019), para uma expectativa de produtividade de soja de 5t ha<sup>-1</sup>. Essas diferenças levantam a hipótese de que as doses recomendadas pela SBCS/NEPAR (2019) possam estar incorporando, de forma implícita, parte das doses de correção à adubação de manutenção, ajustando indiretamente a eficiência de utilização do P. No entanto, as doses recomendadas pela SBCS/NEPAR (2019) para solos argilosos com teores de P muito e baixo podem ser insuficientes para alcançar os rendimentos desejáveis.

Embora solos mais argilosos exijam doses maiores para atingir o nível crítico, a redução da disponibilidade de P tende a ser menos acentuada nesses solos. Uma vez alcançada essa concentração, solos com maior capacidade tampão mantêm o P disponível de forma mais estável e por períodos mais longos de cultivo (Novais e Smyth, 1999).

Quando há limitações financeiras ou operacionais, especialmente em solos argilosos, onde as doses requeridas são elevadas, a adubação corretiva gradual se mostra uma alternativa viável. Essa estratégia consiste na aplicação da quantidade total estimada para a correção de forma parcelada no sulco de semeadura, acrescentando-se à dose de adubação de reposição do nutriente exportado, em até 5 cultivos Sousa *et al.*, (2016).

O efeito da dose e da localização deve ser considerado, uma vez que doses menores aplicadas de forma localizada tendem a ser mais eficientes em suprir a demanda das plantas. Entretanto, esse suprimento pode não ser equivalente ao obtido quando uma dose elevada de P é aplicada em todo o volume de solo explorado pelas raízes. A relação entre dose e localização apresenta-se como uma alternativa de caráter econômico, e não biológico. Do ponto de vista biológico, a estratégia mais adequada envolveria a aplicação de elevadas doses de P distribuídas em todo o volume de solo, por meio da adubação corretiva total (Novais e Smyth, 1999).

Considerando o aumento da concentração de P próximo à zona de aplicação do fertilizante fosfatado, predominantemente na camada 0-10 cm (Nunes *et al.*, 2020), a redução da dose estimada para a correção total pela metade pode ser tecnicamente consistente, desde que a aplicação seja realizada de forma localizada e associada à adubação de reposição do nutriente exportado.

Contudo, deve-se considerar que a aplicação em sulco de semeadura de fontes menos solúveis, como os fosfatos naturais reativos (FNR), não produz o mesmo efeito que a aplicação a lanço com posterior incorporação (Motomiya *et al.*, 2004; Oliveira-Junior; Prochnow; Klepker, 2008). Esse comportamento evidencia que o aumento do contato entre o solo e a rocha fosfática é determinante para elevar a taxa de dissolução do fosfato (Sousa *et al.*, 2016). Assim,

quando se optar pela fosfatagem via correção gradual, recomenda-se priorizar fontes de maior solubilidade.

Por outro lado, apesar da eficiência inferior no ano de aplicação, os FNR, quando incorporados, podem apresentar eficiência equivalente ou superior ao superfosfato triplo em cultivos subsequentes. A eficiência agrônômica inicial dos fosfatos naturais reativos está diretamente associada ao seu grau de solubilidade, sendo recomendável que apresentem valores superiores a 40% de solubilidade em ácido cítrico a 2% (Sousa *et al.*, 2016).

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em sistemas de semeadura direta já implantados, quando o único limitante é a insuficiência de P, a adubação corretiva gradual com fontes mais solúveis de P torna-se tecnicamente viável. Nessas condições, o parcelamento da aplicação da dose de P visando uma correção da camada 0-10cm configura-se como uma prática consistente sob uma perspectiva técnica, desde que associada adubação planejada para repor o P considerando a exportação prevista pela cultura. A associação com plantas de cobertura dotadas de sistema radicular mais agressivo deve ser considerada como estratégia complementar à adubação, a fim de favorecer a ciclagem biológica e a redistribuição do P aplicado via fertilizante no perfil do solo.

Quando há limitações de ordem física, como camadas compactadas, ou áreas sob conversão de uso agrícola, a aplicação da dose de correção total de P e posterior incorporação na camada arável (0-20cm) torna-se tecnicamente mais apropriada. Considerando as elevadas doses de P frequentemente requeridas em programas de correção, a utilização de fontes de menor custo pode tornar-se uma estratégia economicamente mais viável. A utilização de fontes de menor solubilidade, como os fosfatos naturais reativos, podem promover um efeito residual prolongado, embora apresentem eficiência inicial inferior em comparação às fontes mais solúveis. Solubilidades superiores a 40% em ácido cítrico a 2% são desejáveis e podem atenuar as limitações no fornecimento inicial de P às culturas.

A capacidade de tamponamento de fósforo (CTP) dos solos mostrou-se fortemente influenciada pelo teor de argila. Entretanto, solos com teores de argila semelhantes apresentaram capacidades de tamponamento distintas, possivelmente em função de diferenças na mineralogia da fração argila, evidenciando que o teor de argila, isoladamente, pode não ser suficiente para estimar com precisão essa capacidade. Assim, a incorporação do fósforo remanescente (Prem) aos modelos preditivos amplia a robustez da estimativa da CTP<sub>1</sub>, ao

integrar informações de natureza quantitativa (teor de argila) e qualitativa (reatividade e mineralogia da fração argila).

As evidências de redução das capacidades de tamponamento de P observadas neste ensaio indicam potenciais incrementos na eficiência da adubação fosfatada à medida que os sítios de sorção são progressivamente neutralizados. A condição do solo (seja já corrigido, não corrigido ou com histórico de elevadas entradas de P) pode exercer influência significativa sobre a efetividade das doses subsequentes aplicadas. Nesse contexto, torna-se necessário revisar e recalibrar as recomendações de adubação fosfatadas, especialmente em sistemas de plantio já estabelecidos, de modo a otimizar o aproveitamento do nutriente e a sustentabilidade da produção agrícola.

## 9 CONCLUSÕES

- ✓ A capacidade de tamponamento de P (CTP) é reduzida com a aplicação de doses elevadas de P.
- ✓ A capacidade de tamponamento de P (CTP<sub>1</sub>) aumentou significativamente com o teor de argila.
- ✓ A inclusão do fósforo remanescente (Prem) melhora a capacidade explicativa do modelo de predição da CTP<sub>1</sub>.
- ✓ A utilização da tabela para a estimativa da CTP<sub>1</sub> mostrou-se consistente como ferramenta prática de recomendação. Entretanto, valores agrupados de CTP<sub>1</sub> obtidos pelo modelo exponencial em função do teor de argila indica estratificação mais acentuada entre 400 e 550 g kg<sup>-1</sup>, sugerindo que o uso dos modelos de predição seja mais apropriado nesse intervalo.
- ✓ Para o estado do Paraná, onde não há método formal de adubação corretiva fosfatada, o método baseado na CTP<sub>1</sub> oferece uma base técnica inicial para a definição de doses de correção.
- ✓ Solos com disponibilidade de P muito baixo e com teor de argila inferior a 250 g kg<sup>-1</sup> requerem em torno de 135 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> para atingir o nível de suficiência.
- ✓ Solos com disponibilidade de P muito baixo e com teor de argila entre 250 g kg<sup>-1</sup> a 400 g kg<sup>-1</sup> requerem em torno de 170 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> para atingir o nível de suficiência.
- ✓ Solos com disponibilidade de P muito baixo e com teor de argila superior a 400 g kg<sup>-1</sup> requerem em torno de 450 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> para atingir o nível de suficiência.

- ✓ A correção gradual de P, visando à melhoria da fertilidade da camada de 0–10 cm por meio da aplicação de fontes solúveis, em sistemas de cultivo já consolidados, apresenta respaldo técnico e teórico, configurando-se como uma estratégia consistente de manejo.
- ✓ As recomendações de adubação fosfatada vigentes no estado do Paraná podem não ser suficientes para alcançar rendimentos desejáveis em solos com disponibilidade de fósforo muito baixa a baixa, especialmente em solos com teores de argila superiores a 400 g kg<sup>-1</sup>.
- ✓ Os resultados do presente estudo reforçam que a harmonização das recomendações de P entre diferentes regiões geográficas é viável.

## REFERÊNCIAS:

- ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000.
- BARBOSA, M. A.; FERRAZ, R. L. S.; COUTINHO, E. L. M.; COUTINHO NETO, A. M.; SILVA, M. S.; FERNANDES, C.; RIGOBELLO, E. C. Multivariate analysis and modeling of soil quality indicators in long-term management systems. **Science of The Total Environment**, v. 657, p. 457–465, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.441>.
- BARROW, N. J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. **Journal Soil Science**, 34: 733-750, 1983. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1983.tb01068.x>.
- BARROW, N. J. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. In: BRADY, N. C. (ed.). **Advances in Agronomy**. Academic Press, v. 38, p. 183-230, 1985. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60676-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60676-8).
- BARROW, N. J.; DEBNATH, A. Effect of phosphate status on the sorption and desorption properties of some soils of Northern India. **Plant and Soil**, 2014. DOI 10.1007/s11104-014-2042-8.
- BARROW, N. J.; DEBNATH, A. Three residual benefits of applying phosphate fertilizer. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, p. 1168–1176, 2018. DOI: 10.2136/sssaj2018.03.0115.
- BARROW, N. J.; SEN, A.; ROY, N.; DEBNATH, A. The soil phosphate fractionation fallacy. **Plant and Soil**, 2020. DOI: 10.1007/s11104-020-04476-6.
- BORTOLUZZI, E. C.; PÉREZ, C. A. S.; ARDISSON, J. D.; TIECHER, T.; CANER, L. Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. **Applied Clay Science**, v. 104, p. 196-204, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.11.032>.
- BOUYOUCOS, G. J. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. **Agronomy Journal**, v. 54, n. 5, p. 464–465, 1962.
- BOWDEN, J. W.; NAGARAJAN, S.; BARROW, N. J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Describing the adsorption of phosphate, citrate and selenite on a variable-charge mineral surface. **Australian Journal of Soil Research**, v. 18, p. 49–60, 1980.
- BHERING, S. B.; SANTOS, H. G.; MANZATTO, C. V.; BOGNOLA, I. A.; FASOLO, P. J.; CARVALHO, A. P.; POTTER, R. O.; CURCIO, G. R. **Mapa de solos do estado do Paraná**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2007. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/339505/mapa-de-solos-do-estado-do-parana>. Acesso em: 25/07/2025.

CAMPOS, M.; ANTONANGELO, J.A.; ALLEONI, L.R.F. Phosphorus sorption index in humid tropical soils. **Soil & Tillage Research**, v. 156, p. 110-118, 2016. DOI: 10.1016/j.still.2015.09.020

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van.; Determinação da matéria orgânica do solo. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (eds.). **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. p. 173–180.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van.; COSCIONE, A. R.; ANDRADE, J. C de.; Determinação de alumínio, cálcio e magnésio trocáveis em extrato de cloreto de potássio. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (eds.). **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. p. 213–230.

CONDRON, L. M.; NEWMAN, S. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, p. 830–840, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-011-0363-2>.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS-RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2016.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida pela aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 925–930, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000400009>.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v. 84, n. 2, p. 133–144. 1957.

DONAGEMMA, G. K.; VIANA, J.H.M.; ALMEIDA, B.G.de.; RUIZ, H.A.; KLEIN, V.A.; DECHEN, S.C.F.; FERNANDES, R.B.A. Análise granulométrica. In: TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Eds.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília, DF: Embrapa -Solos, 2017. p. 95-115.

DUARTE-MONZÓN, A. D.; RASCHE-ALVAREZ, J. W.; GATIBONI, L. C.; FROSI, G.; MARTINS, A. P.; INDA, A. V.; RHEINHEIMER D. S.; TIECHER, T. Phosphorus recommendations in Brazil and Paraguay: A systematic review. **Soil Science Society of America Journal**, v. 90, e70232, 2026. DOI: 10.1002/saj2.70232.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 62–68, 2016a. DOI: 10.1016/j.still.2015.07.017.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; TIECHER, T.; BARRÓN, V. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, p. 369–379, 2016b. DOI: 10.1590/1413-70542016404023016.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; CERETTA, C. A.; BASSO, C. J. Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos líquidos de suínos em pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1753-1761, 2008.

GATIBONI, L. C.; VARGAS, C. O.; ALBUQUERQUE, J. A.; ALMEIDA, J. A.; STAHL, J.; CHAVES, D. M.; BRUNETTO, G.; DALL'ORSOLETTA, D. J.; RAUBER, L. P. Phosphorus fractions in soil after successive crops of *Pinus taeda* L. without fertilization. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 7, e20160595, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160595>.

GOLDBERG, S.; SPOSITO, G. On the mechanism of specific phosphate adsorption by hydroxylated mineral surfaces: A review. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 16:8, 801-821, 1985. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00103628509367646>.

GOLDBERG, S.; FORSTER, H. S.; GODFREY, C. L. Molybdenum adsorption on oxides, clay minerals, and soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, p. 425-432, 1996. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000020013x>.

GOTZ, L. F.; HOLZSCHUH, M. J.; VARGAS, V. P.; TELES, A. P. B.; MARTINS, M. M.; PAVINATO, P. S. Phosphate Management for High Soybean and Maize Yields in Expansion Areas of Brazilian Cerrado. **Agronomy**, Basel, v. 13, p. 1–14, 2023.

GOTZ, L. F.; ALVES, E. E. N.; HURTARTE, L. C. C.; CONDRON, L. M.; VERGÜTZ, L.; HILL, S.; SOUSA, D. M. G.; ALMEIDA, A. N. F.; NUNES, R. S.; PAVINATO, P. S. Assessment of legacy phosphorus speciation under long-term tillage and phosphate fertilizer management in a tropical soil. **Soil and Tillage Research**, v. 256, 2025, 106877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106877>.

GUILHERME, L. R. G.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; RENÓ, N. B.; MACHADO, R. A. F. Adsorção de fósforo em solos de várzea do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.27-34, 2000.

GUPPY, C. N.; MENZIES, N. W.; MOODY, P. W.; BLAMEY, F. P. C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Soil Research**, v. 43, n. 2, p. 189-202, 2005. DOI: 10.1071/SR04049.

HAVLIN, J. L. et al. Phosphorus. In: HAVLIN, J. L. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 7. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2013. p. 191–205.

HAYNES, R.J. Lime and phosphate in the soil-plant system. **Advances in Agronomy**, v.37, p. 249-315, 1984.

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, 1982. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x>.

JUO, A. S. R.; FOX, R. L. Phosphate sorption characteristics of some bench-mark soils of West Africa. *Soil Science*, v. 124, n. 6, p. 370–376, 1977. DOI: 10.1097/00010694-197712000-00007.

LEPSCH, I.G. Capacidade de troca de cátions. In: LEPSCH, I.G. **19 Lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. p. 106-19.

MAGID, J.; TIESSEN, H.; CONDRON, L. M. Dynamics of organic phosphorus in soils under natural and agricultural ecosystems. In: PICCOLO, A. (ed.). **Humic substances in terrestrial ecosystems**. Amsterdam: Elsevier Science B.V. cap. 11, p. 429-466, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-044481516-3/50012-8>.

MABAGALAA, F. S.; MNG'ONG'O, M. E. On the tropical soils: The influence of organic matter (OM) on phosphate bioavailability. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29, n. 5, p. 3635–3641, 2022. DOI: 10.1016/j.sjbs.2022.02.056.

MARTINAZZO, R.; RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto afetado pela adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 563–568, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000300016>.

MOTOMIYA, W. R.; FABRÍCIO, A. C.; MARCHETTI, M. E.; GONÇALVES, M. C.; ROBAINA, A. D.; NOVELINO, J. O. Phosphate application methods for soybean under no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 4, p. 307–312, 2004. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2004.v39.6774.

MUGGEO, V. M. R. segmented: An R Package to Fit Regression Models with Broken-Line Relationships. **R News**, v. 8, n. 1, p. 20–25, 2008.

MUMBACH, G.L.; GATIBONI, L.C.; DALL'ORSOLETTA, D. J.; SCHMITT, D.E.; GRANDO, D.L.; SOUZA JUNIOR, A.A.; BRIGNOLI, F.M.; IOCHIMS, D.A. Refining phosphorus fertilizer recommendations based on buffering capacity of soils from Southern Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.45, n.1, p.1-17, 2021. DOI: 10.36783/18069657rbs20200113.

MUMBACH, G. L. **Incorporação de fósforo na implantação do sistema de plantio direto e calibração da adubação fosfatada de correção em solos do RS e SC**. 2021. 115 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Lages, 2021. Orientador: Luciano Colpo Gatiboni.

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.

NELSON, J. T.; ADJUIK, T. A.; MOORE, E. B.; VANLOOCKE, A. D.; REYES, A. R.; MCDANIEL, M. D. A simple, affordable, do-it-yourself method for measuring soil maximum water holding capacity. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 55, n. 8, p. 1190–1204, 2024. DOI: 10.1080/00103624.2023.2296988.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1999. p. 2-45.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-550.

NUNES, R. S.; SOUSA, D. M. G. de; GOEDERT, W. J.; OLIVEIRA, L. E. Z. de; PAVINATO, P. S.; PINHEIRO, T. D. 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, 2020. DOI: 10.3389/feart.2020.00350.

OLIVEIRA, C.M.B de.; GATIBONI, L.C.; MIQUELLUTI, D. J.; SMYTH, T.J.; ALMEIDA. Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo e Constante de Energia de Ligação em Latossolo Bruno em razão de diferentes ajustes do modelo de Langmuir. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v-38, n.1, p. 1805-1815, 2014.

OLIVEIRA, L. E. Z.; SOUSA, D. M. G. de; FIGUEIREDO, C. C. de; NUNES, R. de S.; MALAQUIAS, J. V. Long-term phosphate fertilization strategies evaluation in a Brazilian Oxisol. **Agronomy Journal**, [S.l.], v. 112, n. 6, p. 4941-4950, jun. 2020. DOI: 10.1002/agj2.20324. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agj2.20324>.

OLIVEIRA JUNIOR, A.; PROCHNOW, L. I.; KLEPKER, D. Eficiência agronômica de fosfato natural reativo na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 5, p. 623-631, 2008.

OLSEN, S. R.; KHASAWNEH, F. E. **Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils**. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (eds.). *The role of phosphorus in agriculture*. Madison, WI: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1980. p. 361-410.

PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, v.30, p. 1-50, 1978. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60702-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60702-6).

PARFITT, R. L. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. **Journal of Soils Science**, 40:359 369, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1989.tb01280.x>

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Organic compounds from plant extracts and their effect on soil phosphorus availability. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 10, p. 1379–1388, out. 2008. DOI: 10.1590/S0100-204X2008001000017.

PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; SOLTANGHEISI, A.; ROCHA, G. C.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, p. 15615, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-72302-1.

PILLON, C. N.; MIELNICZUK, J.; MARTIN NETO, L. Dinâmica da matéria orgânica no ambiente. Pelotas: **Embrapa Clima Temperado**, 2002, p.41.(Embrapa Clima Temperado. Documentos, 105). ISSN 1516-8840.

PORDER, S.; HILLEY, G. E. Linking chronosequences with the rest of the world: predicting soil phosphorus content in denuding landscapes. **Biogeochemistry**, v. 102, p. 153–166, 2011. DOI: 10.1007/s10533-010-9428-3.

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van. Determinação do pH em cloreto de cálcio e da acidez total. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (eds.). **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. p. 181–188.

QUAGGIO, J. A.; VAN RAIJ, B.; MALAVOLTA, E. Alternative use of the SMP-buffer solution to determine lime requirement of soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 16, n. 3, p. 245–260, 1985. DOI: 10.1080/00103628509367600.

QUAGGIO, J.A.; MATTOS JUNIOR, D.; RAIJ, B.V. Fósforo. In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; MATTOS JUNIOR, D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B.V. (Eds.). **Boletim 100**, SP: Instituto Agrônomo de Campinas, 2022. p.95-105.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; ZULLO, M. A. T. O método tampão SMP para determinação da necessidade de calagem de solos do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 38, n. 7, p. 57–69, 1979.

RANNO, S. K.; SILVA, L. S.; GATIBONI, L. C.; RHODEN, A.C. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 1, p. 21-28, 2007.

REIS, T.H.P.; GUIMARAES, P.T.G.; FURTINI NETO, A.E.; GUERRA, A.F.; CURI, N. Soil phosphorus dynamics and availability and irrigated coffee yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.503-512, 2011. DOI: 10.1590/ S0100-06832011000200019.

RODRIGUES, M.; PAVINATO, P. S.; WITHERS, P. J. A.; TELES, A. P. B.; HERRERA, W. F. B. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 542, p. 1050-1061, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.118>.

RODRIGUES, M.; WITHERS, P. J. A.; SOLTANGHEISI, A.; VARGAS, V.; HOLZSCHUH, M.; PAVINATO, P. S. Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104770, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2020.104770.

ROGERI, D.A. **Uso do índice P-remanescente como indicador do poder tampão de fósforo em solos**. 2013. 140p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Orientador: Clesio Gianello.

ROGERI, D.A.; GIANELLO, C.; AMORIM, M.B. Substitution of Clay Content for P-Remaining as an Index of the Phosphorus Buffering Capacity for Soils of Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.40, p.1-14, 2016. DOI:10.1590/18069657rbcs20140535.

ROY, E. D.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; DELLA COLETTA, L.; LINS, S. R. M.; VAZQUEZ, F. F.; WILLIG, E.; SPERA, S. A.; VAN WEY, L. K.; PORDER, S. The

phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, London, v. 2, n. 5, 2016.

ROY, E. D.; WILLIG, E.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; VAZQUEZ, F. F.; PEGORINI, L.; SPERA, S. A.; PORDER, S. Soil phosphorus sorption capacity after three decades of intensive fertilization in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 249, p. 206-214, 2017. DOI: 10.1016/j.agee.2017.08.004.

RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.2, p.576-586, 2008.

RYDEN, J. C.; SYERS, J. K. Rationalisation of ionic strength and cation effects on phosphate sorption by soils. **Journal of Soil Science**, v. 26, n. 4, p. 395-406, 1975. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1975.tb01963. x.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Version 4.4.1. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024.

SAMPLE, EC., SOPER, R.I., RACZ, GJ. Reactions of phosphate fertilizer in soils, In: KHASAWNEH, F.C. (Ed.), SAMPLE, EC (Ed.), KAMPRATH, EJ. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: ASA, 1980. p. 260-310.

SANCHEZ, P. A. **Propriedades e Manejo de Solos nos Trópicos**. Tradução de Alfredo Scheid. São Paulo: Editora A Gazeta Maçônica, 2022.

SANYAL, S.K.; De DATTA, S.K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Advances in Soil Science**, v. 16, p. 1-120, 1991.

SILVA, F. C.; ABREU, M. F.; PÉREZ, D. V.; EIRA, P. A.; ABREU, C. A.; VAN RAIJ, B.; GIANELLO, C.; COELHO, A. M.; QUAGGIO, J. A.; TEDESCO, M. J.; SILVA, C. A.; BARRETO, W. O. Métodos de análises químicas para avaliação da fertilidade do solo. In: SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E.; REIN, T. A. Recomendação de adubação fosfatada com base na capacidade tampão de fósforo do solo para a região do Cerrado. In: **Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição De Plantas**, 27., 2006, Bonito. Resumos expandidos. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/570077>.

SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. S.; REIN, T. A.; SANTOS JÚNIOR, J. D. G. Manejo da adubação fosfatada para culturas anuais no Cerrado. Circular Técnica, n. 33. Planaltina, DF: **EMBRAPA**, 2016.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO – SB-CS-PR. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. 2.ed. Curitiba: Núcleo Estadual Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – NEPAR – SB-CS, 2019.

SPOSITO, G. Soil particle surface charge. In: SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2008. p. 174–191.

SCHACTMAN, D. P.; REID, R. J.; AYLING, S. M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. **Plant Physiology**, v. 116, n. 2, p. 447-453, 1998. DOI: 10.1104/pp.116.2.447.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Nutrição mineral das plantas. In: **TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. cap. 5, p. 95–112.

TEIXEIRA, W. G.; MACEDO, R. S.; MARTINS, G. C. A cor do solo: interpretando as cores do solo com a finalidade de monitorar processos de recuperação em áreas. Manaus: **Embrapa Amazônia Ocidental**, 2009.

TEIXEIRA, P.C.; CAMPOS, D.V. B de.; SALDANHA, M.F.C. Fósforo disponível. In: TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Eds.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília, DF: Embrapa -Solos, 2017. p. 95-115.

TEIXEIRA, P.C.; CAMPOS, D.V. B de.; BIANCHI, S.R.; PÉREZ, D.V.; SALDANHA, M.F.C.; Cátions trocáveis. In: TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Eds.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília, DF: Embrapa - Solos, 2017. p. 209-232.

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

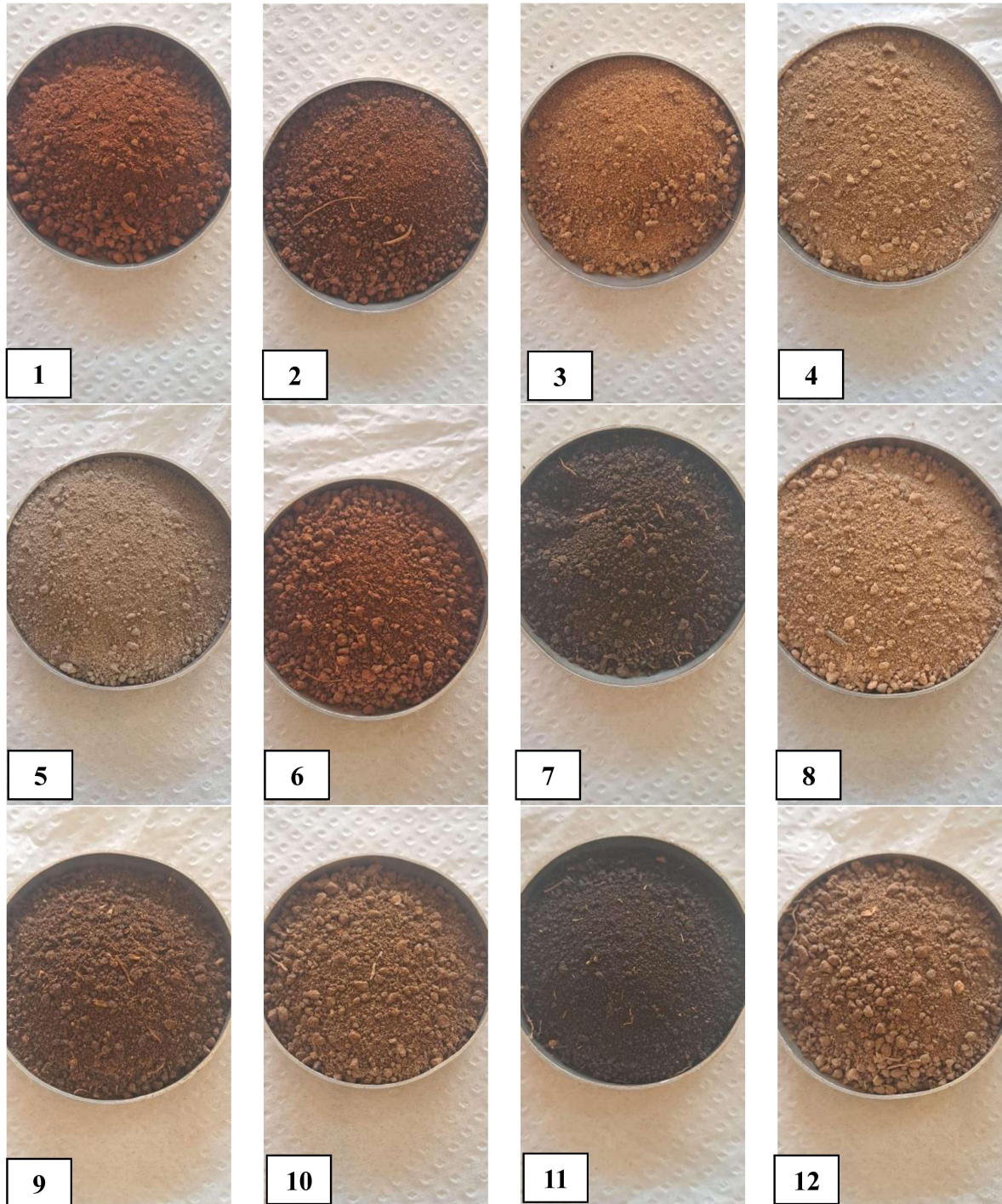
VIANA, J. H.M.; DONAGEMMA, G. K.; TEIXEIRA, W. G. Umidade residual e fator ‘f’. In: TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Eds.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília, DF: Embrapa -Solos, 2017. p. 31-32.

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

WITHERS, P. J. A.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S. de; GUILHERME, L. R. G.; BENITES, V. de M.; GATIBONI, L. C.; DE SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. de S.; ROSELEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA Júnior, A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, London, v. 8, p. 1-13, 2018.

## APÊNDICES

**Apêndice 1.** Registro fotográfico da coloração de solos coletados na camada de 0–20 cm em diferentes regiões do estado do Paraná.





13



14



15



16



17



18



19



20



21



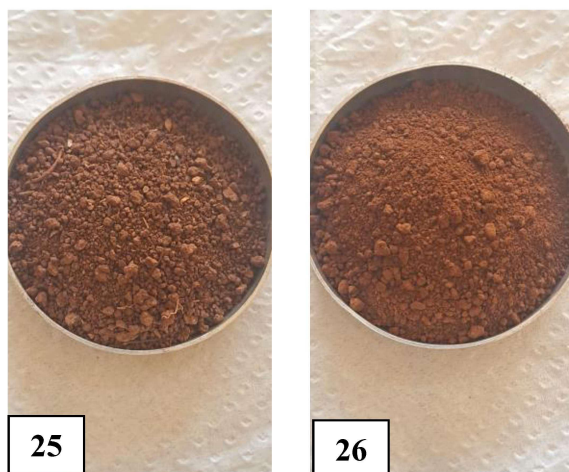
22



23



24



1 - Bandeirantes; 2 - Jacarezinho-1; 3 - Jacarezinho-2; 4 - Ribeirão do Pinhal; 5 - Ventania; 6 - Tibagi; 7 - Castro; 8 - Palmeira; 9 - Pinhais; 10 - Ponta Grossa; 11 - Imbituva; 12 - Mallet; 13 - General Carneiro; 14 - Pinhão; 15 - Guarapuava; 16 - Mangueirinha; 17 - Boa Ventura de São Roque; 18 - Ivaiporã; 19 - Fenix; 20 - Maringá; 21 - Alto Paraná; 22 - Guairaçá; 23 - Loanda; 24 - Tapira; 25 - Cascavel; 26 - Santa Helena.

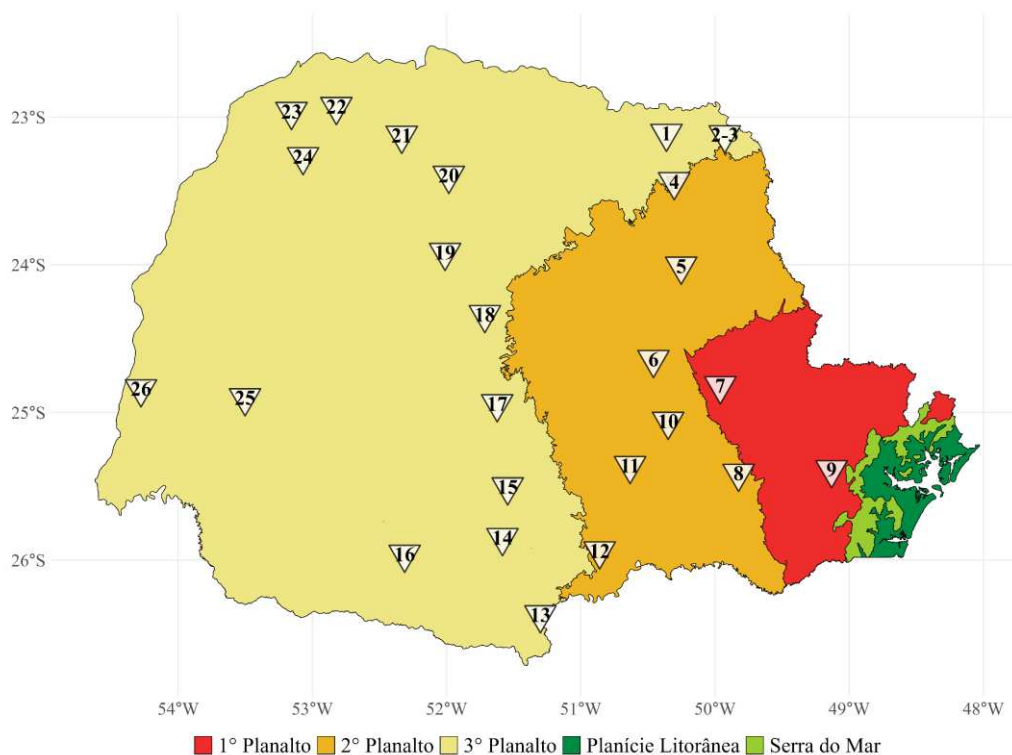
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 2.** Registro fotográfico de amostras de solo coletadas na camada de 0–20 cm em diferentes regiões do estado do Paraná, após incubação por 20 dias, preparadas para extração de P com Mehlich-1.



**Fonte:** do autor, 2026.

### Apêndice 3. Distribuição espacial dos pontos amostrais nos três Planaltos Paranaenses.

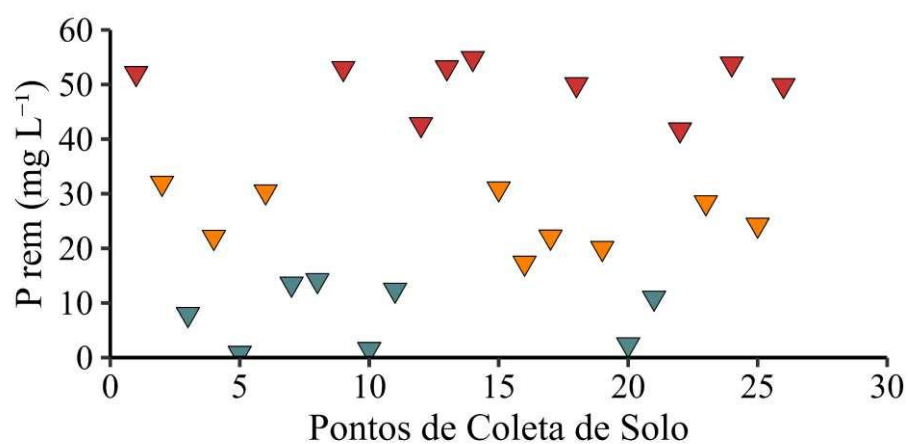


1-Bandeirantes; 2- Jacarezinho-1; 3-Jacarezinho-2; 4-Ribeirão do Pinhal; 5- Ventania; 6-Tibagi; 7- Castro; 8- Palmeira; 9-Pinhais; 10-Ponta Grossa; 11-Imbituva; 12-Mallet; 13-General Carneiro; 14-Pinhão; 15-Guarapuava; 16-Mangueirinha; 17- Boa Ventura de São Roque; 18- Ivaiporã; 19-Fenix; 20-Maringá; 21- Alto Paraná; 22- Guairaçá; 23-Loanda; 24-Tapira; 25 - Cascavel; 26- Santa Helena.

Base cartográfica: Instituto Água e Terra – IAT.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

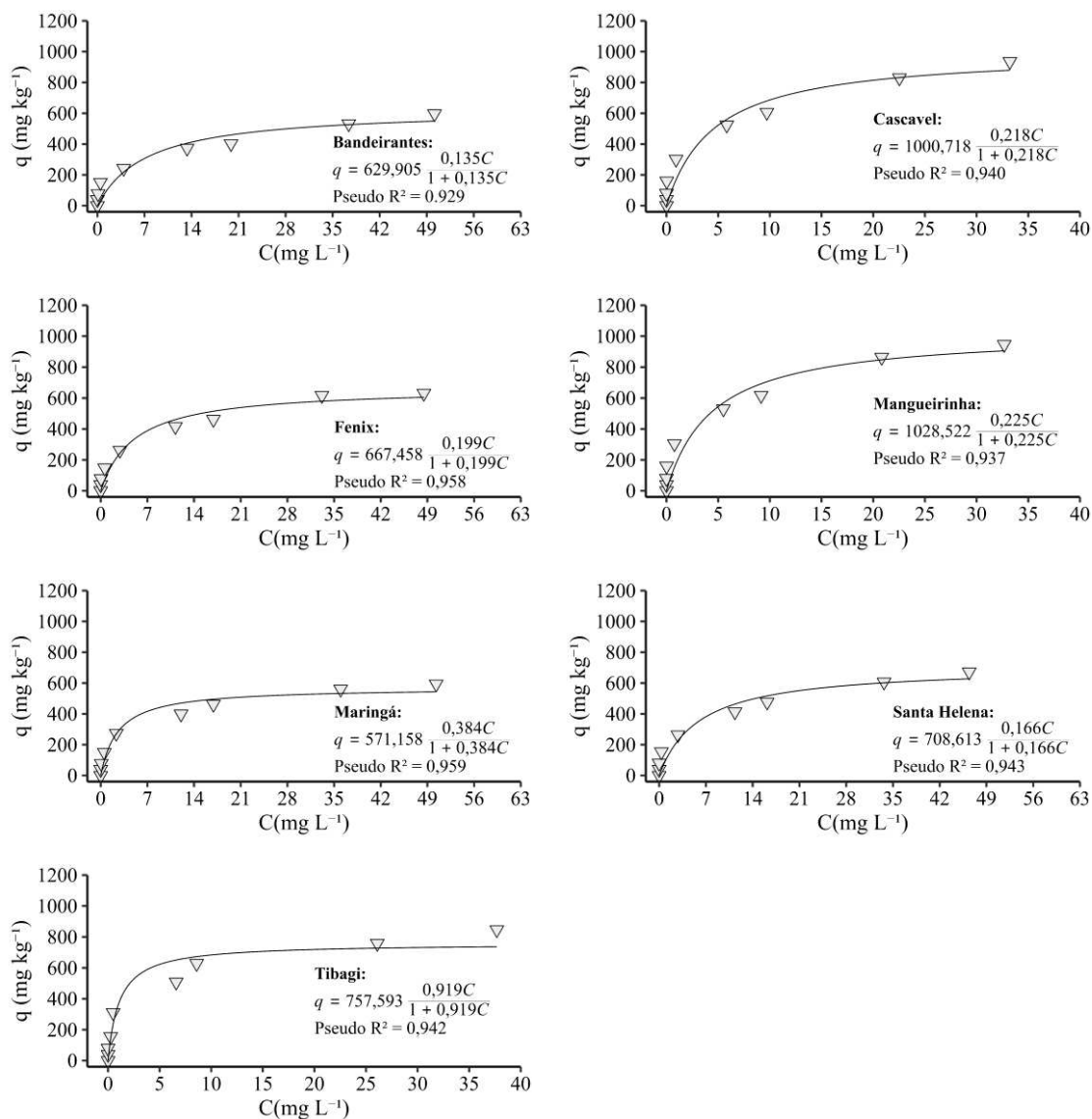
### Apêndice 4. Agrupamento dos valores de fósforo remanescente (Prem).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

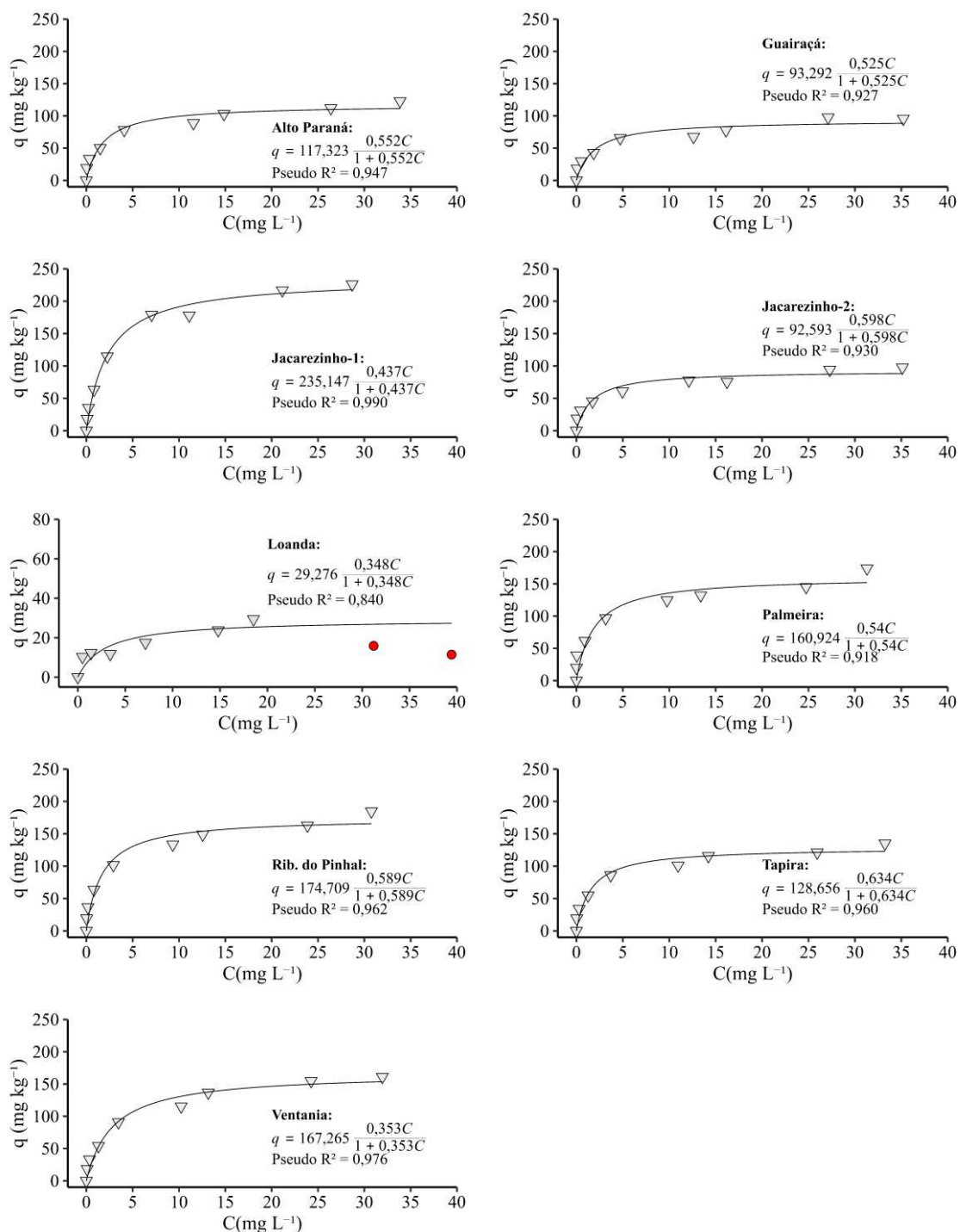
# **Apêndice 5.** Curvas de sorção de P construídas a partir do modelo hiperbólico de Langmuir.

Solos com P remanescente entre 20 e 40 mg L<sup>-1</sup> de P.



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

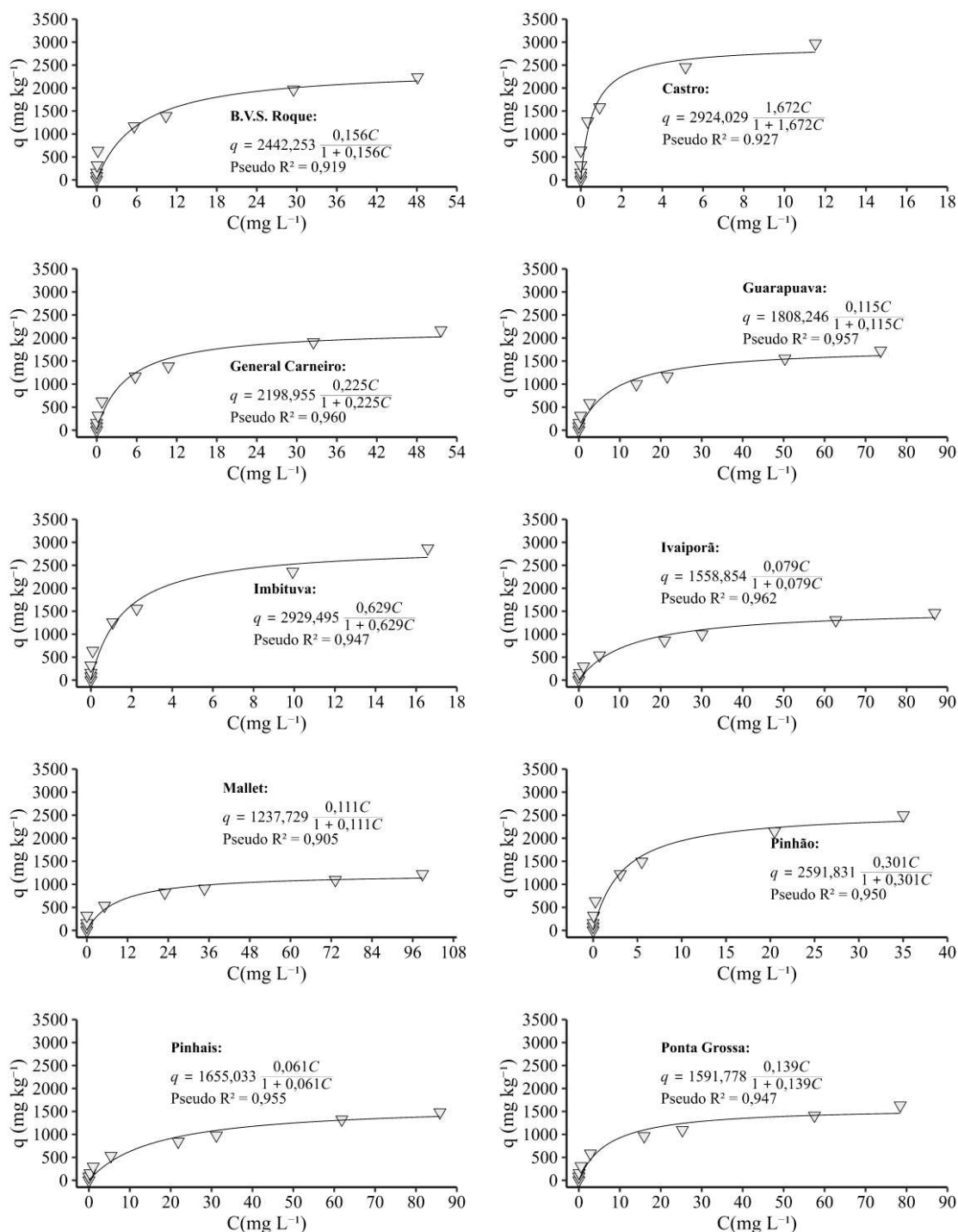
# **Apêndice 6.** Curvas de sorção de P construídas a partir do modelo hiperbólico de Langmuir.



Solos com P remanescente acima  $40 \text{ mg L}^{-1}$  de P. \*\* Pontos destacados em vermelho foram tomados como outliers.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

## Apêndice 7. Curvas de sorção de P construídas a partir do modelo hiperbólico de Langmuir.



Solos com P remanescente abaixo de  $20 \text{ mg L}^{-1}$  de P.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

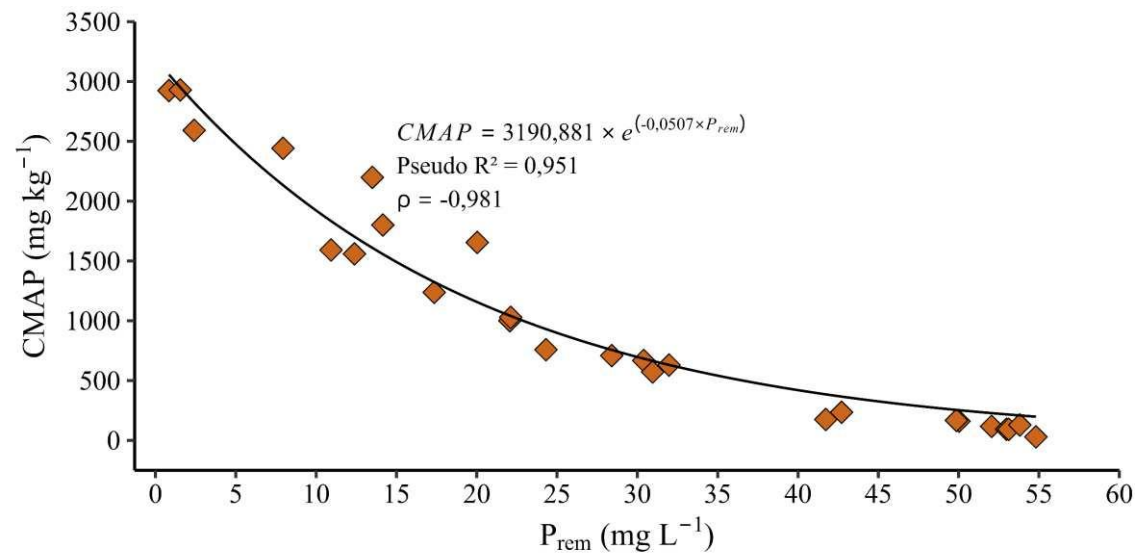
**Apêndice 8.** Níveis de significância dos coeficientes ajustados pelo modelo hiperbólico de Langmuir.

| Local              | * <i>C</i> <i>M</i> <i>A</i> <i>P</i> | * <i>k</i> |
|--------------------|---------------------------------------|------------|
|                    | <i>p</i> - valor                      |            |
| Alto Paraná        | 1,36 x 10 <sup>-6</sup>               | 0,022      |
| Bandeirantes       | 0,00011                               | 0,07871    |
| B. V. de São Roque | 0.000194                              | 0,0961     |
| Cascavel           | 8,15 x 10 <sup>-5</sup>               | 0,0681     |
| Castro             | 2,16 x 10 <sup>-5</sup>               | 0,0521     |
| Fenix              | 8,23 x 10 <sup>-6</sup>               | 0,0280     |
| General Carneiro   | 7,84 x 10 <sup>-6</sup>               | 0,0284     |
| Guarapuava         | 1,66 x 10 <sup>-5</sup>               | 0,0347     |
| Guairaçá           | 3,40 x 10 <sup>-6</sup>               | 0,0346     |
| Imbituva           | 1,66 x 10 <sup>-5</sup>               | 0,0310     |
| Ivaiporã           | 1,53 x 10 <sup>-5</sup>               | 0,0247     |
| Jacarezinho -1     | 2,00 x 10 <sup>-8</sup>               | 0,000347   |
| Jacarezinho -2     | 2,33 x 10 <sup>-6</sup>               | 0,0344     |
| Loanda             | 0,00245                               | 0,165      |
| Maringá            | 1,36 x 10 <sup>-6</sup>               | 0,0243     |
| Mallet             | 8,99 x 10 <sup>-5</sup>               | 0,125      |
| Mangueirinha       | 0,000102                              | 0,0754     |
| Palmeira           | 9,76 x 10 <sup>-6</sup>               | 0,0656     |
| Pinhais            | 5,82 x 10 <sup>-5</sup>               | 0,0367     |
| Pinhão             | 1,69 x 10 <sup>-5</sup>               | 0,0334     |
| Ponta Grossa       | 1,59 x 10 <sup>-5</sup>               | 0,054      |
| Ribeirão do Pinhal | 6,98 x 10 <sup>-7</sup>               | 0,0142     |
| Santa Helena       | 4,28 x 10 <sup>-5</sup>               | 0,0557     |
| Tapira             | 4,32 x 10 <sup>-7</sup>               | 0,0115     |
| Tibagi             | 2,77 x 10 <sup>-6</sup>               | 0,0594     |
| Ventania           | 3,66 x 10 <sup>-7</sup>               | 0,00374    |

p-valores em escala decimal (0-1). \* Avaliados por meio do teste t de Student.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 9.** Modelo empírico para estimativa da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP).



\*Os valores médios de P rem e CMAP foram submetidos ao teste de regressão não linear por meio da função *nls* do software R-Studio. A validade do ajuste foi verificada apenas tomando como métrica o parâmetro que mede a qualidade global do ajuste (Pseudo R<sup>2</sup>). ρ: coeficiente de correlação de Spearman.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 10.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Bandeirantes

| Grupo                     | Parâmetro      | Estimativa   | Erro-padrão         | p-valor               |
|---------------------------|----------------|--------------|---------------------|-----------------------|
| Ponto de quebra           | Ψ(Dose)        | 1000,575     | 42,223              |                       |
| Coef. do modelo           | β <sub>0</sub> | 4,346        | 0,794               | 5,06x10 <sup>-6</sup> |
|                           | β <sub>1</sub> | 0,094        | 0,003               | 2x10 <sup>-16</sup>   |
|                           | β <sub>2</sub> | 0,087        | 0,003               | -----                 |
| Grupo                     |                | Convergência | Número de iterações |                       |
| Diagnóstico computacional |                | Sim          | 2                   |                       |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 11.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Jacarezinho-1

| Grupo           | Parâmetro      | Estimativa | Erro-padrão | p-valor                |
|-----------------|----------------|------------|-------------|------------------------|
| Ponto de quebra | Ψ(Dose)        | 173,462    | 28,062      |                        |
| Coef. do modelo | β <sub>0</sub> | 8,594      | 0,912       | 9,60x10 <sup>-11</sup> |
|                 | β <sub>1</sub> | 0,135      | 0,017       | 5,43x10 <sup>-9</sup>  |

|                           | $\beta_2$    | 0,098               | 0,017 | ----- |
|---------------------------|--------------|---------------------|-------|-------|
| Grupo                     | Convergência | Número de iterações |       |       |
| Diagnóstico computacional | sim          | 2                   |       |       |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 12.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Jacarezinho-2

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa          | Erro-padrão | p-valor               |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------|-----------------------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 146,840             | 29,712      |                       |
|                           | $\beta_0$           | 1,625               | 1,781       | 0,368                 |
| Coef. do modelo           | $\beta_1$           | 0,190               | 0,033       | $2,87 \times 10^{-6}$ |
|                           | $\beta_2$           | 0,160               | 0,34        | -----                 |
| Grupo                     | Convergência        | Número de iterações |             |                       |
| Diagnóstico computacional | Sim                 | 2                   |             |                       |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 13.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Rib. do Pinhal.

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa          | Erro-padrão | p-valor                |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------|------------------------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 351,285             | 35,769      |                        |
|                           | $\beta_0$           | -0,287              | 0,839       | 0,735                  |
| Coef. do modelo           | $\beta_1$           | 0,101               | 0,009       | $1,07 \times 10^{-12}$ |
|                           | $\beta_2$           | 0,103               | 0,010       | -----                  |
| Grupo                     | Convergência        | Número de iterações |             |                        |
| Diagnóstico computacional | Sim                 | 2                   |             |                        |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 14.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Ventania

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa          | Erro-padrão | p-valor               |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------|-----------------------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 198,530             | 35,766      |                       |
|                           | $\beta_0$           | 5,124               | 1,204       | 0,0002                |
| Coef. do modelo           | $\beta_1$           | 0,178               | 0,226       | $5,78 \times 10^{-9}$ |
|                           | $\beta_2$           | 0,114               | 0,230       | -----                 |
| Grupo                     | Convergência        | Número de iterações |             |                       |
| Diagnóstico computacional | Sim                 | 2                   |             |                       |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 15.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Tibagi

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa   | Erro-padrão         | p-valor             |
|---------------------------|---------------------|--------------|---------------------|---------------------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 843,739      | 44,457              |                     |
| Coef. do modelo           | $\beta_0$           | 0,533        | 0,564               | 0,352               |
|                           | $\beta_1$           | 0,040        | 0,002               | $2 \times 10^{-16}$ |
|                           | $\beta_2$           | 0,056        | 0,003               | -----               |
| Grupo                     |                     | Convergência | Número de iterações |                     |
| Diagnóstico computacional |                     | Sim          | 2                   |                     |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 16.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Castro

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa   | Erro-padrão         | p-valor             |
|---------------------------|---------------------|--------------|---------------------|---------------------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 3000         | 478,778             |                     |
| Coef. do modelo           | $\beta_0$           | 4,157        | 1,015               | 0,0003              |
|                           | $\beta_1$           | 0,040        | 0,002               | $2 \times 10^{-16}$ |
|                           | $\beta_2$           | 0,012        | 0,002               | -----               |
| Grupo                     |                     | Convergência | Número de iterações |                     |
| Diagnóstico computacional |                     | Não          | -----               |                     |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 17.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Palmeira

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa   | Erro-padrão         | p-valor                |
|---------------------------|---------------------|--------------|---------------------|------------------------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 397,423      | 44,566              |                        |
| Coef. do modelo           | $\beta_0$           | 8,085        | 0,891               | $2,31 \times 10^{-10}$ |
|                           | $\beta_1$           | 0,165        | 0,009               | $2 \times 10^{-16}$    |
|                           | $\beta_2$           | 0,092        | 0,011               | -----                  |
| Grupo                     |                     | Convergência | Número de iterações |                        |
| Diagnóstico computacional |                     | Sim          | 2                   |                        |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 18.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Pinhais

| Grupo           | Parâmetro           | Estimativa | Erro-padrão | p-valor |
|-----------------|---------------------|------------|-------------|---------|
| Ponto de quebra | $\Psi(\text{Dose})$ | 1915,314   | 185,725     |         |

|                           |           |              |                     |                     |
|---------------------------|-----------|--------------|---------------------|---------------------|
|                           | $\beta_0$ | 3,782        | 1,479               | 0,016               |
| Coef. do modelo           | $\beta_1$ | 0,0588       | 0,003               | $2 \times 10^{-16}$ |
|                           | $\beta_2$ | 0,036        | 0,004               | -----               |
| Grupo                     |           | Convergência | Número de iterações |                     |
| Diagnóstico computacional |           | Sim          | 2                   |                     |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

#### **Apêndice 19.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Ponta Grossa

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa   | Erro-padrão         | p-valor |
|---------------------------|---------------------|--------------|---------------------|---------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 1076,262     | 153,507             |         |
|                           | $\beta_0$           | 1,275        | 3,040               | 0,678   |
| Coef. do modelo           | $\beta_1$           | 0,035        | 0,012               | 0,0057  |
|                           | $\beta_2$           | 0,073        | 0,012               | -----   |
| Grupo                     |                     | Convergência | Número de iterações |         |
| Diagnóstico computacional |                     | Sim          | 3                   |         |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

#### **Apêndice 20.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Imbituva

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa   | Erro-padrão         | p-valor |
|---------------------------|---------------------|--------------|---------------------|---------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 243,483      | 180,482             |         |
|                           | $\beta_0$           | 3,891        | 2,243               | 0,092   |
| Coef. do modelo           | $\beta_1$           | 0,026        | 0,018               | 0,163   |
|                           | $\beta_2$           | 0,0179       | 0,0183              | -----   |
| Grupo                     |                     | Convergência | Número de iterações |         |
| Diagnóstico computacional |                     | Sim          | 2                   |         |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

#### **Apêndice 21.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Mallet

| Grupo           | Parâmetro           | Estimativa | Erro-padrão | p-valor               |
|-----------------|---------------------|------------|-------------|-----------------------|
| Ponto de quebra | $\Psi(\text{Dose})$ | 441,675    | 70,514      |                       |
|                 | $\beta_0$           | 2,668      | 1,566       | 0,098                 |
| Coef. do modelo | $\beta_1$           | 0,067      | 0,121       | $4,44 \times 10^{-6}$ |
|                 | $\beta_2$           | 0,069      | 0,012       | -----                 |

| Grupo                     | Convergência | Número de iterações |
|---------------------------|--------------|---------------------|
| Diagnóstico computacional | Sim          | 2                   |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 22.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Gen. Carneiro

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa          | Erro-padrão | p-valor |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------|---------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 865,400             | 264,287     |         |
| Coef. do modelo           | $\beta_0$           | 0,474               | 2,581       | 0,855   |
|                           | $\beta_1$           | 0,025               | 0,010       | 0,0149  |
|                           | $\beta_2$           | 0,030               | 0,010       | -----   |
| Grupo                     | Convergência        | Número de iterações |             |         |
| Diagnóstico computacional | Sim                 | 2                   |             |         |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 23.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Pinhão

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa          | Erro-padrão | p-valor                |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------|------------------------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 1076,406            | 97,638      |                        |
| Coef. do modelo           | $\beta_0$           | 6,451               | 0,797       | $3,06 \times 10^{-9}$  |
|                           | $\beta_1$           | 0,040               | 0,003       | $1,53 \times 10^{-14}$ |
|                           | $\beta_2$           |                     |             |                        |
| Grupo                     | Convergência        | Número de iterações |             |                        |
| Diagnóstico computacional | Sim                 | 2                   |             |                        |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 24.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Guarapuava

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa          | Erro-padrão | p-valor |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------|---------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 758,051             | 91,203      |         |
| Coef. do modelo           | $\beta_0$           | 0,375               | 1,351       | 0,783   |
|                           | $\beta_1$           | 0,017               | 0,005       | 0,003   |
|                           | $\beta_2$           | 0,041               | 0,005       | -----   |
| Grupo                     | Convergência        | Número de iterações |             |         |
| Diagnóstico computacional | Sim                 | 2                   |             |         |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 25.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Mangueirinha

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa   | Erro-padrão         | p-valor                |
|---------------------------|---------------------|--------------|---------------------|------------------------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 913,339      | 48,685              |                        |
| Coef. do modelo           | $\beta_0$           | -0,014       | 0,640               | 0,982                  |
|                           | $\beta_1$           | 0,042        | 0,003               | $3,36 \times 10^{-16}$ |
|                           | $\beta_2$           | 0,059        | 0,003               | -----                  |
| Grupo                     |                     | Convergência | Número de iterações |                        |
| Diagnóstico computacional |                     | Sim          | 2                   |                        |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 26.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em B.V.S. Roque

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa   | Erro-padrão         | p-valor |
|---------------------------|---------------------|--------------|---------------------|---------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 979,737      | 286,129             |         |
| Coef. do modelo           | $\beta_0$           | 1,601        | 3,118               | 0,610   |
|                           | $\beta_1$           | 0,028        | 0,012               | 0,0251  |
|                           | $\beta_2$           | 0,037        | 0,012               | -----   |
| Grupo                     |                     | Convergência | Número de iterações |         |
| Diagnóstico computacional |                     | Sim          | 3                   |         |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 27.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Ivaiporã

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa   | Erro-padrão         | p-valor |
|---------------------------|---------------------|--------------|---------------------|---------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 1137,771     | 166,109             |         |
| Coef. do modelo           | $\beta_0$           | 0,706        | 2,789               | 0,802   |
|                           | $\beta_1$           | 0,038        | 0,011               | 0,001   |
|                           | $\beta_2$           | 0,065        | 0,011               | -----   |
| Grupo                     |                     | Convergência | Número de iterações |         |
| Diagnóstico computacional |                     | Sim          | 2                   |         |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 28.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Fenix

| Grupo           | Parâmetro           | Estimativa | Erro-padrão | p-valor |
|-----------------|---------------------|------------|-------------|---------|
| Ponto de quebra | $\Psi(\text{Dose})$ | 830,198    | 96,148      |         |

|                           |           |              |                     |                       |
|---------------------------|-----------|--------------|---------------------|-----------------------|
|                           | $\beta_0$ | 2,900        | 1,758               | 0,109                 |
| Coef. do modelo           | $\beta_1$ | 0,051        | 0,008               | $1,27 \times 10^{-7}$ |
|                           | $\beta_2$ | 0,080        | 0,009               | -----                 |
| Grupo                     |           | Convergência | Número de iterações |                       |
| Diagnóstico computacional |           | Sim          | 2                   |                       |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

#### **Apêndice 29.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Maringá

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa   | Erro-padrão         | p-valor |
|---------------------------|---------------------|--------------|---------------------|---------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 440,195      | 44,297              |         |
| Coef. do modelo           | $\beta_0$           | 0,491        | 1,490               | 0,743   |
|                           | $\beta_1$           | 0,038        | 0,011               | 0,002   |
|                           | $\beta_2$           | 0,104        | 0,012               | -----   |
| Grupo                     |                     | Convergência | Número de iterações |         |
| Diagnóstico computacional |                     | Sim          | 2                   |         |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

#### **Apêndice 30.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Alto Paraná

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa   | Erro-padrão         | p-valor |
|---------------------------|---------------------|--------------|---------------------|---------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 49,433       | 24,181              |         |
| Coef. do modelo           | $\beta_0$           | 3,112        | 2,237               | 0,190   |
|                           | $\beta_1$           | 0,270        | 0,095               | 0,008   |
|                           | $\beta_2$           | 0,141        | 0,095               | -----   |
| Grupo                     |                     | Convergência | Número de iterações |         |
| Diagnóstico computacional |                     | Sim          | 2                   |         |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

#### **Apêndice 31.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Guairaçá

| Grupo           | Parâmetro           | Estimativa | Erro-padrão | p-valor             |
|-----------------|---------------------|------------|-------------|---------------------|
| Ponto de quebra | $\Psi(\text{Dose})$ | 500,000    | 168,086     |                     |
| Coef. do modelo | $\beta_0$           | -3,771     | 1,907       | 0,057               |
|                 | $\beta_1$           | 0,414      | 0,020       | $2 \times 10^{-16}$ |
|                 | $\beta_2$           | -0,059     | 0,024       | -----               |

| Grupo                     | Convergência | Número de iterações |
|---------------------------|--------------|---------------------|
| Diagnóstico computacional | Não          | -----               |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 32.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Loanda

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa          | Erro-padrão | p-valor             |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------|---------------------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 500,000             | 100,391     |                     |
| Coef. do modelo           | $\beta_0$           | -1,368              | 1,777       | 0,447               |
|                           | $\beta_1$           | 0,431               | 0,019       | $2 \times 10^{-16}$ |
|                           | $\beta_2$           | -0,093              | 0,022       | -----               |
| Grupo                     | Convergência        | Número de iterações |             |                     |
| Diagnóstico computacional | Não                 | -----               |             |                     |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 33.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Tapira

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa          | Erro-padrão | p-valor |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------|---------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 188,443             | 48,838      |         |
| Coef. do modelo           | $\beta_0$           | 0,268               | 2,319       | 0,909   |
|                           | $\beta_1$           | 0,102               | 0,0044      | 0,0255  |
|                           | $\beta_2$           | 0,153               | 0,044       | -----   |
| Grupo                     | Convergência        | Número de iterações |             |         |
| Diagnóstico computacional | Sim                 | 2                   |             |         |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 34.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Cascavel

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa          | Erro-padrão | p-valor |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------|---------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 511,892             | 125,484     |         |
| Coef. do modelo           | $\beta_0$           | 0,539               | 1,676       | 0,750   |
|                           | $\beta_1$           | 0,034               | 0,013       | 0,014   |
|                           | $\beta_2$           | 0,047               | 0,013       | -----   |
| Grupo                     | Convergência        | Número de iterações |             |         |
| Diagnóstico computacional | Sim                 | 2                   |             |         |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 35.** Parâmetros estimados do modelo de regressão segmentada em Santa Helena

| Grupo                     | Parâmetro           | Estimativa   | Erro-padrão         | p-valor                |
|---------------------------|---------------------|--------------|---------------------|------------------------|
| Ponto de quebra           | $\Psi(\text{Dose})$ | 906,463      | 66,621              |                        |
| Coef. do modelo           | $\beta_0$           | -1,846       | 1,436               | 0,208                  |
|                           | $\beta_1$           | 0,066        | 0,006               | $3,98 \times 10^{-12}$ |
|                           | $\beta_2$           | 0,100        | 0,007               | -----                  |
| Grupo                     |                     | Convergência | Número de iterações |                        |
| Diagnóstico computacional |                     | Sim          | 2                   |                        |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 36.** Parâmetros estimados do modelo de regressão simples em Castro

| Grupo           | Parâmetro | Estimativa | Erro-padrão | p-valor             |
|-----------------|-----------|------------|-------------|---------------------|
| Coef. do modelo | $\beta_0$ | 1,904      | 1,246       | 0,136               |
|                 | $\beta_1$ | 0,045      | 0,0006      | $2 \times 10^{-16}$ |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 37.** Parâmetros estimados do modelo de regressão simples em Guairaçá

| Grupo           | Parâmetro | Estimativa | Erro-padrão | p-valor             |
|-----------------|-----------|------------|-------------|---------------------|
| Coef. do modelo | $\beta_0$ | -1,692     | 1,665       | 0,317               |
|                 | $\beta_1$ | 0,388      | 0,005       | $2 \times 10^{-16}$ |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 38.** Parâmetros estimados do modelo de regressão simples em Loanda

| Grupo           | Parâmetro | Estimativa | Erro-padrão | p-valor             |
|-----------------|-----------|------------|-------------|---------------------|
| Coef. do modelo | $\beta_0$ | 1,873      | 1,846       | 0,317               |
|                 | $\beta_1$ | 0,391      | 0,006       | $2 \times 10^{-16}$ |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 39.** Parâmetros estimados do modelo de regressão exponencial de predição da CTP-1 em função do teor de argila

| Grupo           | Parâmetro | Estimativa | Erro-padrão | p-valor |
|-----------------|-----------|------------|-------------|---------|
| Coef. do modelo | b         | 2,550      | 1,039       | 0,022   |

|                           | a            | 0,0037              | 0,0006 | $3,57 \times 10^{-6}$ |
|---------------------------|--------------|---------------------|--------|-----------------------|
| Grupo                     | Convergência | Número de iterações |        |                       |
| Diagnóstico computacional | Sim          | 9                   |        |                       |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 40.** Parâmetros estimados do modelo de regressão linear de predição da CTP-1 em função do teor de argila

| Grupo           | Parâmetro | Estimativa | Erro-padrão | p-valor               |
|-----------------|-----------|------------|-------------|-----------------------|
| Coef. do modelo | b         | 7,492      | 3,961       | 0,072                 |
|                 | a         | 0,057      | 0,007       | $1,22 \times 10^{-7}$ |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 41.** Parâmetros estimados do modelo de regressão exponencial de predição da CTP-1 em função do Prem

| Grupo                     | Parâmetro    | Estimativa          | Erro-padrão | p-valor               |
|---------------------------|--------------|---------------------|-------------|-----------------------|
| Coef. do modelo           | b            | 39,496              | 4,869       | $4,69 \times 10^{-8}$ |
|                           | a            | -0,027              | 0,0007      | 0,0004                |
| Grupo                     | Convergência | Número de iterações |             |                       |
| Diagnóstico computacional | Sim          | 12                  |             |                       |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 42.** Parâmetros estimados do modelo de regressão linear de predição da CTP-1 em função do Prem

| Grupo           | Parâmetro | Estimativa | Erro-padrão | p-valor                |
|-----------------|-----------|------------|-------------|------------------------|
| Coef. do modelo | b         | 37,767     | 3,158       | $4,23 \times 10^{-11}$ |
|                 | a         | -0,634     | 0,010       | $1,36 \times 10^{-6}$  |

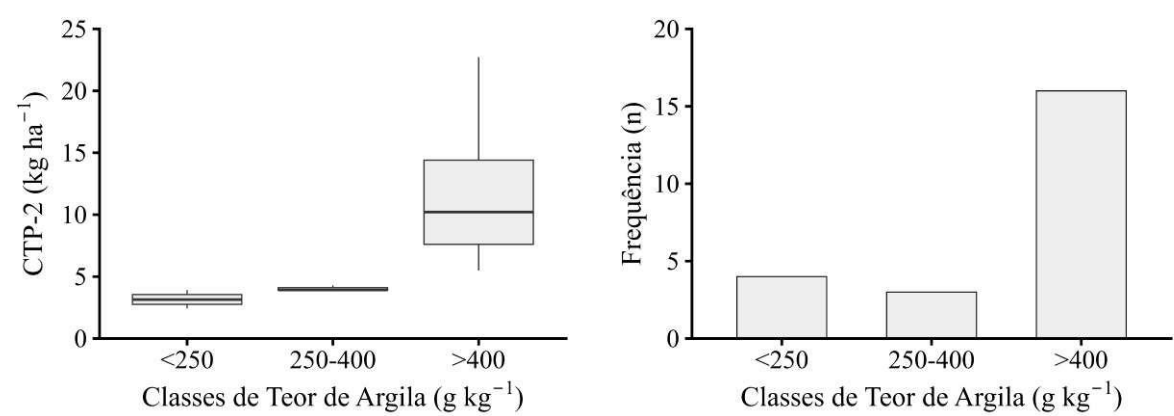
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 43.** Parâmetros estimados do modelo de regressão multiplica de predição da CTP-1 em função do teor de argila e Prem

| Grupo           | Parâmetro | Estimativa | Erro-padrão | p-valor               |
|-----------------|-----------|------------|-------------|-----------------------|
| Coef. do modelo | c         | 1,971      | 0,372       | $2,97 \times 10^{-5}$ |
|                 | b         | 0,0026     | 0,0005      | $2,1 \times 10^{-5}$  |
|                 | a         | -0,0194    | 0,006       | 0,002                 |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 44.** Agrupamento dos valores de capacidade de tamponamento de fósforo (CTP-2) de acordo com as classes de argila e frequência de ocorrência.



Solos que não apresentaram mudança de inclinação não participaram da análise por agrupamento.

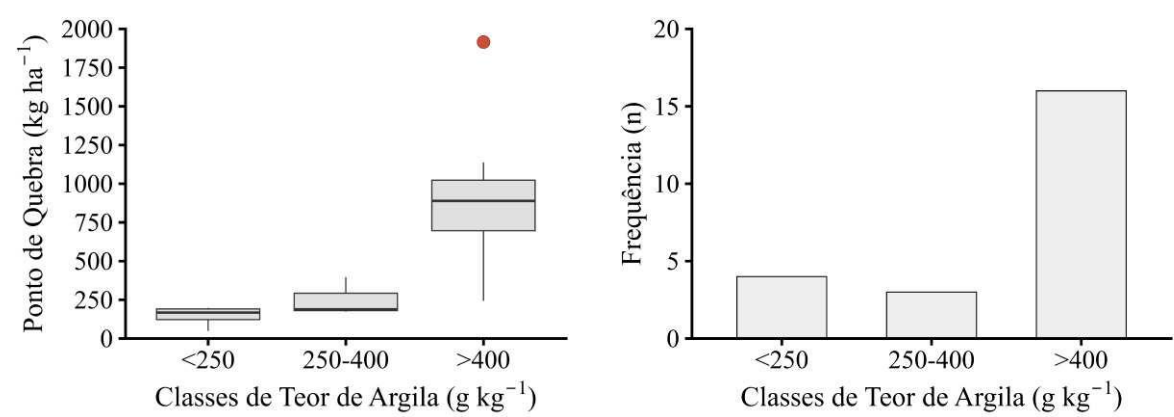
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 45.** Análise exploratória: variabilidade da capacidade de tamponamento de fósforo (CTP-2) em classes de teor de argila.

| Classes<br>g kg <sup>-1</sup>  | CTP-2                |        |         |       |        |                  |                   |
|--------------------------------|----------------------|--------|---------|-------|--------|------------------|-------------------|
|                                | <sup>(1)</sup> Freq. | Média  | Mediana | Mín.  | Máx.   | <sup>(2)</sup> A | <sup>(3)</sup> DP |
| -----kg ha <sup>-1</sup> ----- |                      |        |         |       |        |                  |                   |
| <250                           | 4                    | 3,161  | 3,145   | 2,433 | 3,922  | 1,489            | 0,650             |
| 250-400                        | 3                    | 4,035  | 3,922   | 3,891 | 4,292  | 0,401            | 0,223             |
| >400                           | 16                   | 11,462 | 10,209  | 5,495 | 22,727 | 17,232           | 4,877             |

CTP-1 em kg de P ha<sup>-1</sup>. <sup>(1)</sup> Frequência de ocorrência. <sup>(2)</sup> Amplitude. <sup>(3)</sup> Desvio padrão amostral

**Apêndice 46.** Agrupamento dos valores dos “pontos de quebra” (PQ) de acordo com as classes de argila e frequência de ocorrência.



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.

**Apêndice 47.** Análise exploratória: variabilidade dos “pontos de quebra” em classes de teor de argila.

| Classes<br>g kg <sup>-1</sup> | Ponto de Quebra      |         |         |         |          |                  |                   |
|-------------------------------|----------------------|---------|---------|---------|----------|------------------|-------------------|
|                               | <sup>(1)</sup> Freq. | Média   | Mediana | Mín.    | Máx.     | <sup>(2)</sup> A | <sup>(3)</sup> DP |
| <250                          | 4                    | 145,813 | 167,641 | 49,433  | 198,535  | 149,102          | 68,037            |
| 250-400                       | 3                    | 252,776 | 188,443 | 172,462 | 397,423  | 224,961          | 125,523           |
| >400                          | 16                   | 877,156 | 889,370 | 243,483 | 1915,314 | 1671,831         | 383,016           |

PQ em kg de P ha<sup>-1</sup>. <sup>(1)</sup> Frequência de ocorrência. <sup>(2)</sup> Amplitude. <sup>(3)</sup> Desvio padrão amostral

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2026.