

# AValiação DE EXTRATORES DE FÓSFORO PARA SOLOS DO PARAGUAI

FORNASARI, Carlos Henrique<sup>1</sup>  
HUBNER, Vitória<sup>2</sup>  
PINTO, Juliana de Souza<sup>3</sup>  
ZANÃO JÚNIOR, Luiz Antônio<sup>4</sup>

## RESUMO

No Paraguai, há escassez de estudos para avaliação da disponibilidade de fósforo no solo, utilizando extratores além do duplo ácido Mehlich-1 (M-1). O objetivo foi avaliar a disponibilidade do fósforo em diferentes solos do Paraguai pelos extratores M-1, Mehlich-3 (M-3) e resina trocadora de ânions (RTA) e calcular os níveis críticos de P para cada um deles. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, no Paraguai, utilizando vasos com capacidade para 3,0 dm<sup>3</sup>, preenchidos com amostras dos solos (Argissolo, Gleissolo, Latossolo, Nitossolo e Planossolo). Os tratamentos foram gerados pela combinação de um fatorial 4x2, sendo quatro doses de fósforo (0, 50, 150 e 300 mg kg<sup>-1</sup> de P) e duas condições de acidez do solo (com e sem calagem), seguindo um delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições. O milho (*Zea mays* L.) foi cultivado por 45 dias, após a conclusão do experimento, foram determinados a produção de matéria seca, o teor e o acúmulo de fósforo na parte aérea das plantas e os teores de P disponível no solo avaliados pelos extratores M-1, M-3 e RTA. As soluções extratoras M-1, M-3 e RTA mostraram-se eficazes na estimativa da disponibilidade de fósforo em solos do Paraguai, com altos coeficientes de correlação entre o fósforo extraído e o seu conteúdo parte aérea das plantas de milho. Os níveis críticos de fósforo, ordenados quantitativamente para os cinco solos, seguiram a sequência: M-3 > RTA > M-1.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Zea mays* L. acidez do solo, níveis críticos.

## EVALUATION OF PHOSPHORUS EXTRACTORS FOR SOILS IN PARAGUAY

## ABSTRACT

In Paraguay, there is a lack of studies to evaluate the availability of phosphorus in the soil, using extractants other than the double acid Mehlich-1 (M-1). The objective was to evaluate the availability of phosphorus in different soils in Paraguay using the extractants M-1, Mehlich-3 (M-3) and anion exchange resin (RTA) and calculate the critical P levels for each of them. The experiment was conducted in a greenhouse, in Paraguay, using pots with a capacity of 3.0 dm<sup>-3</sup>, filled with soil samples (Argisol, Gleissolo, Oxisol, Nitossolo and Planosol). The treatments were generated by the combination of a 4x2 factorial, with four doses of phosphorus (0, 50, 150 and 300 mg kg<sup>-1</sup> of P) and two soil acidity conditions (with and without liming), following an entirely experimental design. randomized, with four repetitions. Corn (*Zea mays* L.) was cultivated for 45 days, after the conclusion of the experiment, the production of dry matter, the content and accumulation of phosphorus in the aerial part of the plants and the levels of available P in the soil were determined, evaluated by the extractors M-1, M-3 and RTA. The extraction solutions M-1, M-3 and RTA proved to be effective in estimating phosphorus availability in Paraguayan soils, with high correlation coefficients between the extracted phosphorus and its content in the aerial part of corn plants. The critical phosphorus levels, ordered quantitatively for the five soils, followed the sequence: M-3 > RTA > M-1.

**KEYWORDS:** *Zea mays* L. soil acidity, critical levels.

## 1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um dos elementos essenciais para a produção de alimentos e biocombustíveis (OLIVEIRA *et al.*, 2022). Embora o conteúdo orgânico de P total nos solos possa atingir valores

<sup>1</sup> Doutor em Engenharia de Energia na Agricultura. Unioeste. E-mail: [carlos\\_fornasari@hotmail.com](mailto:carlos_fornasari@hotmail.com)

<sup>2</sup> Doutoranda em Engenharia de Energia na Agricultura. Unioeste - PR. E-mail: [vitoria.hubner@hotmail.com](mailto:vitoria.hubner@hotmail.com)

<sup>3</sup> Doutoranda em Engenharia de Energia na Agricultura. Unioeste - PR. E-mail: [juliana\\_brturbo@hotmail.com](mailto:juliana_brturbo@hotmail.com)

<sup>4</sup> Pesquisador da Área de Solos do IDR-Paraná. Santa Tereza do Oeste – PR. E-mail: [lzanao@idr.pr.gov.br](mailto:lzanao@idr.pr.gov.br)

tão altos em solos tropicais e subtropicais (PAVINATO *et al.*, 2020), apenas uma quantidade muito pequena deste P estão prontamente disponível para as plantas devido à forte adsorção de P de minerais de argila (FINK *et al.*, 2016).

No ano-safra de 2021-2022 a demanda por este macronutriente aumentou, devido à escassez global de fertilizantes fosfatados, a efeito de vários fatores, especificamente, por conflitos entre países produtores de fertilizantes e alta demanda de energia, afetando a cadeia de fornecimento de fertilizantes e ameaçando a produção agrícola mundial (LANG; MCKEE, 2022).

Portanto, é importante buscar estratégias para que os sistemas agrícolas no Paraguai façam o uso racional deste insumo. Experimentos de longa duração, em campo, mostraram que grande parte (> 70 %) do P excedente adicionado aos solos brasileiros por fertilizantes permanece no solo, principalmente em formas não disponíveis para as culturas (PAVINATO *et al.*, 2020).

Após a aplicação do P em solos ácidos, o elemento tende a ser adsorvido pela superfície das argilas e dos óxidos de Fe e Al, formando compostos de menor solubilidade. Além disso, como consequência da mineralogia e do pH desses solos, o P pode precipitar-se com ferro (Fe), alumínio (Al) e manganês (Mn) (NOVAIS; SMYTH, 1999).

É evidente a complexidade da dinâmica do fósforo no solo e a falta de concordância entre a forma de avaliar a disponibilidade desse elemento para fins agronômicos, mesmo com vários tipos de extratores disponíveis e com eficiência preconizada na literatura, tais como Mehlich-1 (M-1), Mehlich-3 (M-3) e resina de troca aniônica (RTA) (MUMBACK *et al.*, 2018).

Surge, porém, a dúvida quanto à possibilidade de se utilizar resultados de trabalhos de calibrações realizados, destacando que tanto o extrator M-3 quanto a RTA ainda não foram avaliados como possíveis métodos de rotina para a determinação de P em solos do Paraguai. Assim, os objetivos do trabalho foram avaliar a eficiência dos extratores M-1, M-3 e RTA na recuperação de fósforo em diferentes solos do Paraguai e calcular os níveis críticos de P obtidos pelos extratores M-1, M-3 e RTA para obtenção de 90 % da produção máxima estimada.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 DISPONIBILIDADE DO FÓSFORO NO SOLO E A DEPENDÊNCIA DA ADUBAÇÃO FOSFATADA NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLAS**

A disponibilidade do fósforo na solução do solo se dá por três fatores: fator intensidade (I), fator quantidade (Q) e fator capacidade ou poder tampão de P (FCP). À medida que o fósforo é absorvido pela planta o suprimento de I que está em solução, é mantido pelo fator Q,

quantitativamente maior que o I. Há, portanto, um equilíbrio entre o fator I e Q. Esta interdependência caracteriza o fator capacidade de P ou poder tampão de P, quantitativamente definido pela relação Q/I (NOVAIS; SMYTH, 1999).

A dependência da adubação fosfatada na agricultura nas últimas cinco décadas tem sido alarmante, de quase zero em 1960 para 2,2 Tg ano<sup>-1</sup> de P em 2016 (WITHERS *et al.*, 2018). Estima-se o aumento no Brasil de 3 a 5 % ao ano durante a próxima década em relação a utilização de fertilizantes minerais fosfatados e aumento médio de aproximadamente 3,6 % na América Latina, de acordo com as previsões da FAO (2015).

A implementação do plantio direto como prática conservacionista, representa mais de 30 milhões de hectares cultivados (KASSAM *et al.*, 2019). Com isso, os agricultores reduziram as perdas de solo e nutrientes por erosão e escoamento, resultando em um aumento do rendimento das culturas, conforme Franchini *et al.* (2012).

O manejo com plantas de cobertura, rotação de culturas de forma adequada, consórcios de cultivo, plantio direto e pH do solo corrigido constantemente através da técnica da calagem faz aumentar a eficiência do uso de P em até 80 % em solos tropicais (ANTONIADIS *et al.*, 2015; WITHERS *et al.*, 2018).

Nolla *et al.* (2020) correlacionaram correção da acidez do solo através da calagem e disponibilização de fósforo em um Latossolo Vermelho distrófico típico. Observaram um acréscimo nos níveis de P de 13 mg dm<sup>-3</sup> na testemunha para cerca de 20 mg dm<sup>-3</sup> com a aplicação de calcário (dose para elevar a saturação de bases para 60 %). Maiores valores de pH promovem menor capacidade de adsorção de fosfatos, gerando maior eficiência na disponibilização de P.

## 2.2 SOLUÇÕES EXTRATORAS PARA QUANTIFICAÇÃO DE “FÓSFORO DISPONÍVEL” EM SOLOS

Ao longo dos anos, os procedimentos evoluíram em relação a extração de P do solo e, conseqüentemente, houve um avanço nos conceitos sobre a sua disponibilidade. De forma considerável a evolução da conceituação dos fatores intensidade, quantidade, capacidade e difusão, orientou estudos sobre a disponibilidade de P em solos avaliada por diferentes métodos de extração, conforme (LARSEN, 1967).

A falta de concordância em relação aos métodos de determinação para avaliar a disponibilidade de P em solos está relacionada com a complexidade do comportamento do P em solos. As metodologias utilizadas na análise de solo buscam, em geral, avaliar preferencialmente o fator quantidade (SILVA; RAIJ, 1999).

Entre estes métodos podemos citar as soluções ácidas, soluções ácidas com íon complexante e resina trocadora de íons (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Dentre as soluções ácidas, a que se destaca no Brasil, devido ao seu uso em laboratórios de rotina de análise de solo, é a solução extratora chamada Mehlich-1 (M-1), oriunda de uma solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{HCl}$   $0,05 \text{ mol L}^{-1}$  (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Esta solução extratora dissolve predominantemente o P ligado ao Ca e quantidades menores de P ligado a Fe e Al, em função das características de solubilidade dos fosfatos (LARSEN, 1967; OLSEN; KHASAWNEH, 1980).

Mehlich (1984) adaptou o método Mehlich-1, e obteve a última atualização, a solução extratora conhecida como Mehlich-3 (M-3), distinta da anterior devido a substituição do ânion cloreto pelo nitrato. Essa modificação visava a extinguir o efeito corrosivo de cloretos sobre equipamentos, consumíveis e pela adição de EDTA para complexar micronutrientes. A solução M-3 é oriunda dos reagentes  $\text{CH}_3\text{COOH}$   $0,2 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{NH}_4\text{NO}_3$   $0,25 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{NH}_4\text{F}$   $0,015 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{HNO}_3$   $0,013 \text{ mol L}^{-1}$  + EDTA  $0,001 \text{ mol L}^{-1}$ . A M-3 é um exemplo de solução ácida com íon complexante.

Em relação a resina trocadora de íons, no Brasil, o método descrito por Raij *et al.* (1986) é feito com mistura de resinas de troca aniônica e catiônica saturadas com bicarbonato de sódio. Na suspensão aquosa de solo e resina dá-se o processo de extração do P gerando uma transferência do elemento para a resina, na qual o fosfato é adsorvido:  $\text{P lábil} \leftrightarrow (\text{H}_2\text{PO}_4^-)$  solução. Quando se usa uma resina trocadora de ânions saturada com o ânion bicarbonato, tem-se:  $\text{R-NH}_3^+\text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{PO}_4^- \leftrightarrow \text{R-NH}_3^+\text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{HCO}_3^-$ . A reação é de equilíbrio; entretanto, como a capacidade de troca de ânions da resina é elevada, há a transferência do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  da solução para a resina.

Reis *et al.* (2020), determinaram as taxas de recuperação de P do solo e níveis críticos pelos extratores M-1, M-3 e RTA, foram cultivadas plantas de milho (*Zea mays* L.) e concluiu-se que o fósforo remanescente (P-rem) e o teor de argila foram as propriedades do solo que melhor se correlacionaram com as taxas de recuperação de P e níveis críticos de P no solo pelos métodos M-1 e M-3.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O estudo foi realizado no campo experimental da empresa Agronômico, localizado no município de Hernandarias – Paraguai (Latitude 25°15'54.25"S Longitude 54°51'22.47"W). Foram utilizados solos de áreas cultivadas da região Oriental do Paraguai.

#### 3.2 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

O critério para escolha dos solos foi a sua representatividade em relação a área cultivada. A classificação desses solos foi realizada de acordo com Nachtergaele (2001), adaptada para o Paraguai por Gorostiaga *et al.* (1995) e relacionada com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (SANTOS *et al.*, 2019). Desta forma, os solos utilizados nesse experimento foram: 1) Argissolo (Ultisol) - P: Município de Minga Guazu, Departamento de Alto Paraná) = -25.367377° S; -54.859396° O. 2) Latossolo (Oxisol) - L: Município de Hernandarias, Departamento de Alto Paraná) = -25.264684° S; -54.857721° O. 3) Nitossolo (Oxisol) - N: Município de Minga Guazu, Departamento de Alto Paraná) = -25.374538° S; -54.858584° O. 4) Planossolo (Ultisol) - S: Município de Moises Bertoni, Departamento de Caazapa) = -26.456699° S; -56.745348° O. 5) Gleissolo (Aqualf) - G: Município de San Pedro de Ycuamandeyu, Departamento de San Pedro) = -23.668333° S; -57.174033° O.

O experimento foi conduzido no período de maio a setembro de 2023, em casa de vegetação. Foram utilizados vasos plásticos com furos de drenagem e capacidade para 3,0 dm<sup>3</sup>, preenchidos com amostras dos solos.

Para cada tipo de solo os tratamentos foram gerados pela combinação de um fatorial 4x2, sendo quatro doses de fósforo (0, 50, 150 e 300 mg kg<sup>-1</sup> de P) e duas condições de acidez do solo (com calagem e sem calagem). Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), com quatro repetições, totalizando 160 unidades experimentais.

O milho (*Zea mays* L.), híbrido DKB 255PRO4, foi utilizado como espécie vegetal de referência.

## 3.3 MÉTODOS ANALÍTICOS E PROCEDIMENTOS

Todas as amostras de solo foram coletadas na camada de 0-20 cm. Os solos foram secos até peso constante em estufa com circulação forçada (Tecnal – TE-394/5) a uma temperatura de 40°C. Posteriormente, as amostras foram trituradas em moinho tipo martelo (Tecnal TE-330), em seguida peneiradas em malha de 2 mm para a realização das análises químicas e físicas, cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Atributos químicos e físicos dos solos estudados.

| Atributo                                   | Solos     |           |           |            |           |
|--------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|
|                                            | Argissolo | Latossolo | Nitossolo | Planossolo | Gleissolo |
| pH CaCl <sub>2</sub> (1:2,5) <sup>1/</sup> | 4,15      | 4,10      | 4,21      | 4,29       | 4,14      |
| M.O (g kg <sup>-1</sup> )                  | 18,61     | 25,17     | 25,87     | 16,73      | 13,45     |
| P (mg dm <sup>-3</sup> ) - M-1             | 11,34     | 16,68     | 13,69     | 3,41       | 13,22     |
| P (mg dm <sup>-3</sup> ) - M-3             | 16,47     | 32,29     | 16,38     | 4,30       | 20,41     |
| P (mg dm <sup>-3</sup> ) - RTA             | 15,12     | 41,72     | 19,60     | 6,59       | 12,20     |
| P-rem (mg dm <sup>-3</sup> )               | 41,56     | 23,99     | 35,39     | 43,43      | 49,43     |
| K <sup>+</sup> (cmolc dm <sup>-3</sup> )   | 0,14      | 0,23      | 0,13      | 0,14       | 0,06      |
| Ca <sup>2+</sup> (cmolc dm <sup>-3</sup> ) | 2,58      | 4,34      | 4,44      | 2,27       | 3,02      |
| Mg <sup>2+</sup> (cmolc dm <sup>-3</sup> ) | 0,59      | 1,16      | 1,28      | 0,47       | 0,61      |
| Al <sup>3+</sup> (cmolc dm <sup>-3</sup> ) | 0,39      | 1,05      | 0,29      | 0,29       | 0,17      |
| H+Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )             | 4,88      | 7,26      | 6,06      | 3,37       | 3,44      |
| m (%)                                      | 11,68     | 15,55     | 4,72      | 9,25       | 5,10      |
| t (cmolc dm <sup>-3</sup> )                | 3,70      | 6,77      | 6,14      | 3,17       | 3,86      |
| T (cmolc dm <sup>-3</sup> )                | 8,19      | 12,99     | 11,91     | 6,25       | 7,13      |
| V (%)                                      | 40,40     | 44,06     | 49,08     | 46,02      | 51,33     |
| Cu (mg dm <sup>-3</sup> )                  | 4,23      | 3,78      | 3,59      | 0,93       | 2,28      |
| Fe (mg dm <sup>-3</sup> )                  | 66,12     | 33,42     | 38,44     | 119,92     | 133,42    |
| Zn (mg dm <sup>-3</sup> )                  | 2,62      | 3,01      | 5,47      | 1,78       | 2,19      |
| Mn (mg dm <sup>-3</sup> )                  | 85,56     | 93,38     | 118,33    | 19,12      | 37,73     |
| Argila (%)                                 | 15,64     | 73,73     | 37,13     | 11,96      | 11,96     |
| Silte (%)                                  | 24,91     | 23,92     | 27,87     | 23,35      | 21,95     |
| Areia (%)                                  | 59,45     | 2,35      | 35,00     | 64,70      | 66,10     |
| DS (kg dm <sup>-3</sup> )                  | 1,207     | 1,031     | 1,130     | 1,361      | 1,376     |

<sup>1/</sup>Relação solo:solução 1:2,5; K, Cu, Mn, Fe e Zn - Extrator Mehlich-1; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> - Extrator KCl 1,0 mol/L; H + Al - Estimado pelo pH SMP; t - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; T - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V - Saturação por Bases; m - Saturação por Al; MO - Matéria Orgânica = C. Org × 1,724 (Walkley-Black - Colorimetria); P-rem - Fósforo Remanescente; P-M1 - Fósforo Mehlich-1; P-M3 - Fósforo Mehlich-3; P-RTA - Fósforo Resina Trocadora de Ânions; Argila, Silte e Areia - Densímetro Bouyoucos e DS - Densidade do Solo.

A distribuição do tamanho das partículas (conteúdos de argila, areia e silte) foram determinadas pelo método de pipeta, utilizando hidróxido de sódio + hexametáfosfato de sódio como agente dispersante, segundo Teixeira *et al.* (2017). A caracterização química para fins de fertilidade dos solos foi realizada de acordo com Teixeira *et al.* (2017) e analisados o pH em cloreto de cálcio (pH em  $\text{CaCl}_2$ ); cálcio trocável ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio trocável ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e alumínio trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) com extrator cloreto de potássio  $1 \text{ mol L}^{-1}$ ; potássio trocável ( $\text{K}^{+}$ ), cobre (Cu), ferro (Fe), zinco (Zn) e manganês (Mn) com extrator Mehlich-1 contendo  $\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ ; acidez potencial ( $\text{H}^+\text{+Al}$ ) foi estimada através da determinação do pH SMP (FORNASARI *et al.*, 2023); carbono orgânico com dicromato de sódio  $0,667 \text{ mol L}^{-1}$  e  $5 \text{ mol L}^{-1}$  de ácido sulfúrico; enxofre ( $\text{S-SO}_4^{2-}$ ) com extrator de fosfato de cálcio  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ; boro (B) com solução extratora de cloreto de bário  $1,25 \text{ g L}^{-1}$  com aquecimento via micro-ondas, conforme Silva e Raij *et al.* (2001) e fósforo remanescente (P-rem) com solução contendo  $60 \text{ mg L}^{-1}$  de P (ALVAREZ *et al.*, 2000).

Para as extrações de fósforo disponível dos solos foram utilizadas as soluções extratoras Mehlich-1 ( $\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ ), Mehlich-3 ( $\text{CH}_3\text{COOH } 0,2 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{NH}_4\text{NO}_3 \text{ } 0,25 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{NH}_4\text{F } 0,015 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{HNO}_3 \text{ } 0,013 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{EDTA } 0,001 \text{ mol L}^{-1}$ ) todos os procedimentos de extração e determinação segundo Silva (2009) e resina trocadora de íons (Amberlite IRA-400 e Amberlite IR-120) sendo todo preparo de pré-condicionamento, tratamento da resina, extração e determinação baseado em Raij *et al.* (2001).

Para os solos corrigidos, a necessidade de calagem foi calculada com base no método de elevação da saturação de bases a 70%, conforme SBCS/NEPAR (2017). O carbonato de cálcio foi utilizado para garantir uma reação rápida. A aplicação foi realizada na unidade experimental correspondente ao solo corrigido, enquanto o solo natural não recebeu ajustes em sua acidez ativa, trocável ou potencial. Os solos acondicionados nos vasos plásticos foram mantidos com umidade próxima a 80% da capacidade de campo.

Após 15 dias da incubação do carbonato de cálcio, foram retirados  $100 \text{ cm}^3$  de solo para determinação do pH  $\text{CaCl}_2$  e, após 28 dias, tanto o solo corrigido como o natural foram adubados de acordo com Reis *et al.* (2020).

Após 21 dias da aplicação dos nutrientes, foram aplicadas, via solução nutritiva as doses de P (0; 50; 150 e  $300 \text{ mg kg}^{-1}$  de P), na forma de fosfato monoamônico ou MAP, solúvel, com 11 % de N e 60 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Em todos os tratamentos a dose de N a ser aplicada foi padronizada, para que todas as unidades experimentais recebessem a mesma quantidade de N, com aplicação de ureia (45

% de N). Após 17 dias, foram semeadas sete sementes do milho híbrido DKB 255PRO4. Aos 15 e 45 dias após a semeadura, foram aplicados 50 mL de uma solução de ureia ( $5 \text{ g L}^{-1}$ ) em todas as unidades experimentais para complementação da quantidade de N fornecida às plantas.

O experimento foi conduzido com quatro plantas por vaso, cultivadas por 45 dias. Ao final do experimento todas as plantas foram cortadas na base do caule, lavadas e secas em estufa com circulação de ar a  $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$  por 72 h. Após a secagem foram pesadas para determinação da produção de matéria seca da parte aérea. Posteriormente, foram moídas em moinho tipo Willey. A determinação de fósforo no tecido vegetal foi realizada por digestão nítrico-perclórica 3:1 e a dosagem realizada por espectrofotometria, utilizando-se o método do ácido ascórbico, conforme Carmo *et al.* (2000).

Os solos foram coletados em sua totalidade no vaso e enviados para análises. Foram secos em estufa com circulação de ar por 48 h a  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , moídas em moinho tipo martelo e peneiradas com malha de 2,0 mm para análise do P disponível por M-1, M-3 (TEIXEIRA *et al.*, 2017) e RTA. A extração por Mehlich-1 foi realizada na proporção 1:10 solo: solução ( $5 \text{ cm}^3$  para 50 mL do extrator. As amostras foram agitadas com a solução extratora por 5 min e posterior repouso de 16 horas para determinação dos teores de P.

Para extração com resina de troca iônica, foi utilizada uma mistura de resina de troca aniônica (Amberlite IRA-400) e resina de troca catiônica (Amberlite IR-120). As etapas de pré-condicionamento e tratamento da resina para uso foram realizadas conforme descrito em Raij *et al.* (2001). A extração foi realizada agitando-se  $2,5 \text{ cm}^3$  de solo com 25 mL de água e bola de vidro por 15 minutos. Em seguida, a bola de vidro foi retirada e  $2,5 \text{ cm}^3$  de resina trocadora de íons foram adicionados e agitados com solo e água por 16 h. Em seguida, a resina foi removida do solo e agitada por uma hora com uma solução de  $\text{NH}_4\text{Cl}$   $0,8 \text{ mol L}^{-1}$  com  $\text{HCl}$   $0,2 \text{ mol L}^{-1}$  para dessorver o P.

Para avaliação do M-3, a extração foi realizada com  $2,5 \text{ cm}^3$  de solo e 25 mL da solução extratora. Em seguida a mistura foi agitada por 5 minutos em agitador horizontal circular à 200 rpm e filtrada em papel filtro quantitativo. Para a determinação foram transferidos 2 mL do extrato para tubo de 50 mL, adicionados 26 mL da solução de trabalho e agitado. Após 15 minutos, efetuou-se a determinação do P.

Após a obtenção dos extratos de cada extrator, a determinação do P foi realizada por espectrofotometria em 660 nm, utilizando-se o método do ácido ascórbico (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Foram ajustadas equações de regressão relacionando a produção de matéria seca, a quantidade de P acumulada na parte aérea das plantas e os teores de P recuperados pelos extratores

M-1, M-3 e RTA como variáveis das doses de P aplicadas e dos teores de P recuperados pelos extratores testados. Essas equações permitiram calcular os valores das doses de P associadas a 90 % da máxima eficiência física. A partir dos valores das doses de P para MEE e das equações de regressão, que estimam o P extraído dos solos pelos extratores e o P acumulado na planta, como variáveis das doses de P aplicadas, foram determinados os níveis críticos de P nos solos, bem como correlações entre as variáveis para cada tipo de solo estudado.

#### 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

##### 4.1 TEORES DE FÓSFORO PELOS EXTRATORES MEHLICH-1 (M-1), MEHLICH-3 (M-3) E RESINA TROCADORA DE ÂNIONS (RTA).

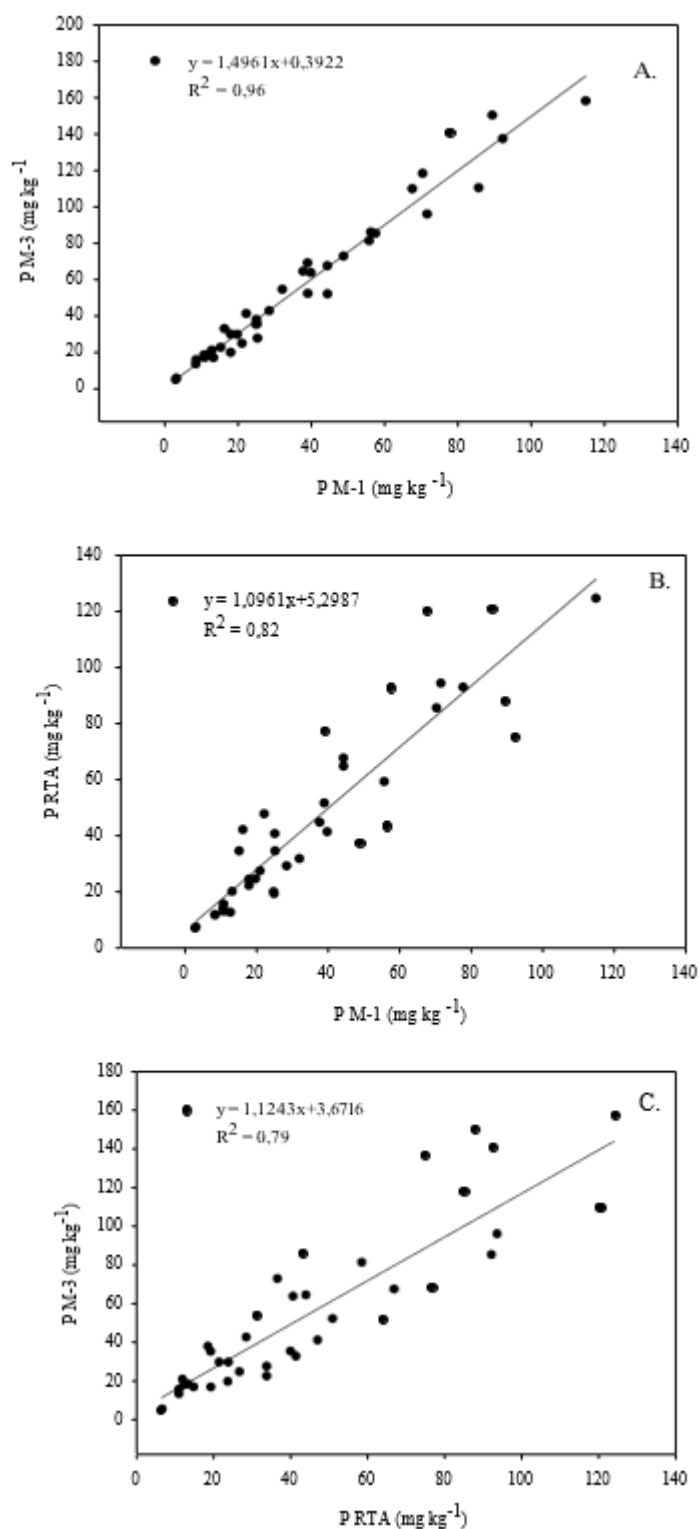
Houve uma forte correlação entre extratores, evidenciada pelo alto coeficiente de determinação entre eles conforme apresentado nas Figuras 1(A) e 1(B). A equação de regressão linear que define a relação entre o P extraído com M-1 e o M-3 é  $PM-3 = 0,3922 - (1,4961 \cdot PM-1)$  ( $r = 0,96^{**}$ ) (Figura 1A). O extrator M-3 extraiu mais P do que o extrator M-1 quando foram reunidos todos os tipos de solos.

Sobral *et al.* (2008), avaliando relações entre os extratores M-1, M-3 e RTA para P em solos dos Tabuleiros Costeiros (Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia) no Brasil, verificou resultados semelhantes ao presente estudo entre a relação do P extraído entre M-1 e M-3 com  $r = 0,96^{**}$ . Corrales (2013), estudando 21 solos da Costa Rica evidenciou coeficiente de correlação linear entre M-1 e M-3 de  $0,91^{***}$ .

Reis *et al.* (2020) avaliaram solos com diferentes características mineralógicas, texturais, teores de matéria orgânica, disponibilidade de P e, por isso, distintas capacidades tampão de fosfato e observaram alta correlação entre os extratores M-1 e M-3 em solos do Estado de Minas Gerais e em um solo do Estado do Espírito Santo, semelhante aos resultados obtidos neste estudo (Figura 1A).

Em cinco solos da Amazônia cultivados com caupi e arroz, Brasil e Muraoka (1997) observaram que os coeficientes de correlação entre os teores de fósforo extraídos pelos métodos M-1 e M-3 foram relativamente baixos. Para amostras coletadas antes do plantio do caupi, o coeficiente foi de  $r = 0,52$ , e para amostras coletadas antes do plantio do arroz, foi de  $r = 0,57$ .

Figura 1 - Correlação entre os teores de P disponível pelos extratores M-1 e M-3 (A); M-1 e RTA (B); RTA e M-3 (C). Correlação realizada com as médias de todas as unidades experimentais  $p < 0,0001$ .



Fonte: Próprio autor.

Já em 360 amostras de solo do Rio Grande do Sul, Bortolon e Gianello (2008) encontraram relação entre os métodos de extração M-1 e M-3, com  $r = 0,95$ . Resultados semelhantes foram

obtidos em um estudo envolvendo seis solos do Estado do Rio Grande do Sul, com um coeficiente de correlação de  $r = 0,99^*$  entre esses dois extratores de P, conforme Bortolon *et al.* (2009).

Comparando os teores de P disponível pelo extrator M-1 e RTA realizada com as médias de todas as unidades experimentais (Figura 1B e 1C), houve relação entre as soluções extratoras, evidenciada pelo coeficiente de correlação entre eles. A equação de regressão linear que define a relação entre o P extraído com M-1 e a RTA é  $PRTA = 5,2987 + (1,096 \cdot PM-1)$  e  $r = 0,82^{**}$ . A RTA extraiu mais P do que o extrator M-1 quando foram reunidos os dados de todos os solos.

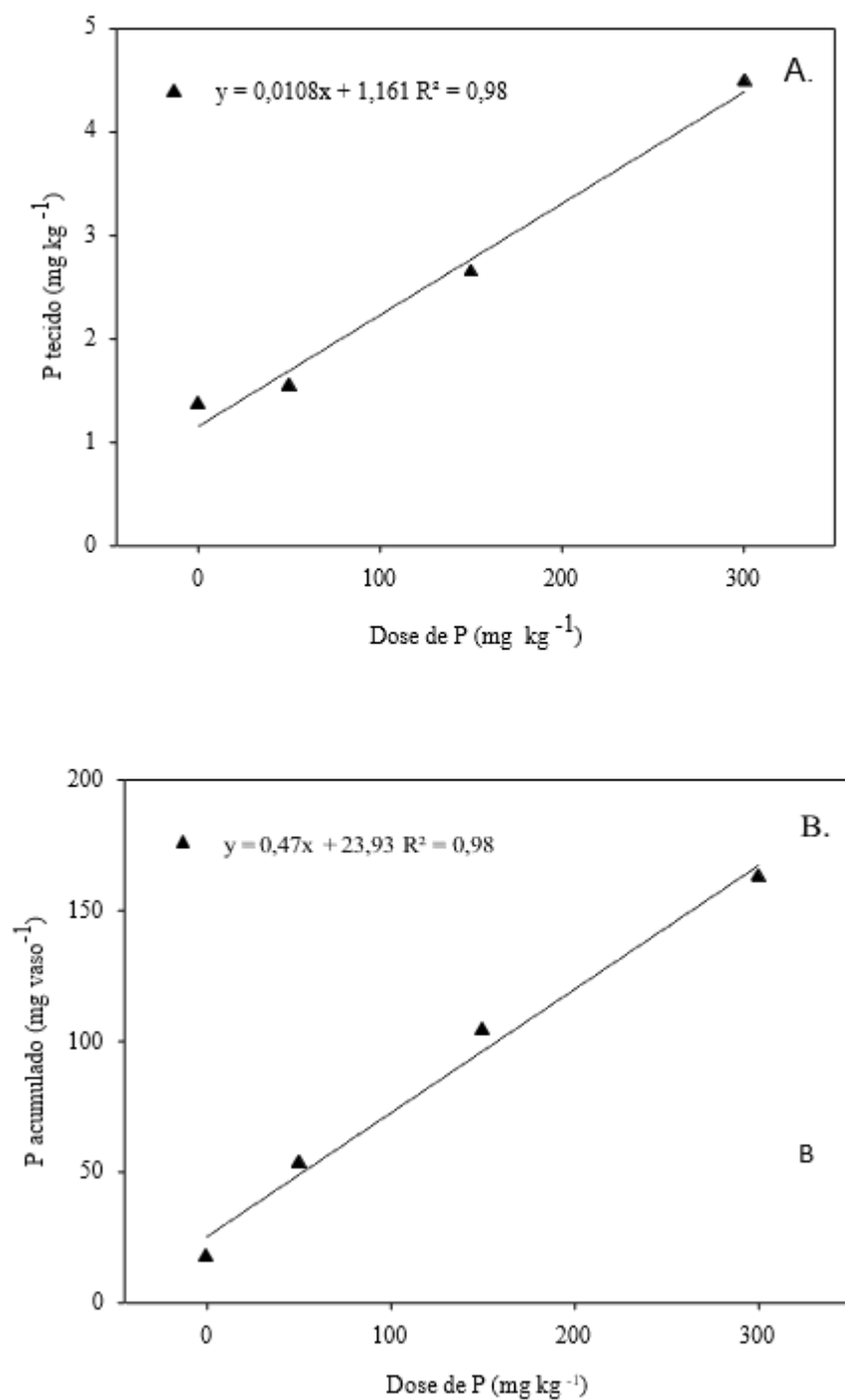
A equação de regressão linear que define a relação entre o P extraído com RTA e M-3 é  $PM-3 = 3,6716 + (1,1243 \cdot PRTA)$ ;  $r = 0,79^{***}$ . A equação indica que o extrator M-3 extrai mais P do que o extrator RTA quando foram reunidos os dados de todos os solos avaliados. Coeficiente de correlação superior ao do presente estudo entre os teores de P disponível extraídos pela RTA e o Mehlich-3 foram encontrados por Reis *et al.* (2020), com  $r = 0,93$ .

Não houve diferença significativa tanto na absorção de P na parte aérea das plantas de milho como no conteúdo acumulado nos vasos em relação as doses de P com calagem e sem calagem para o Gleissolo, Latossolo e Argissolo. As quantidades absorvidas e acumuladas de P estatisticamente foram iguais tanto no ambiente sem calagem como no ambiente com calagem em relação à cada dose. Desta forma ajustou-se, uma única equação para representar a relação entre o fósforo no tecido e o fósforo acumulado nos vasos e as doses de P adicionadas com e sem calcário (Figuras 2 a 5).

#### 4.2 CORRELAÇÕES ENTRE OS TEORES DE P DISPONÍVEL POR CADA EXTRATOR E O CONTEÚDO DE P NA PARTE AÉREA DAS PLANTAS DE MILHO.

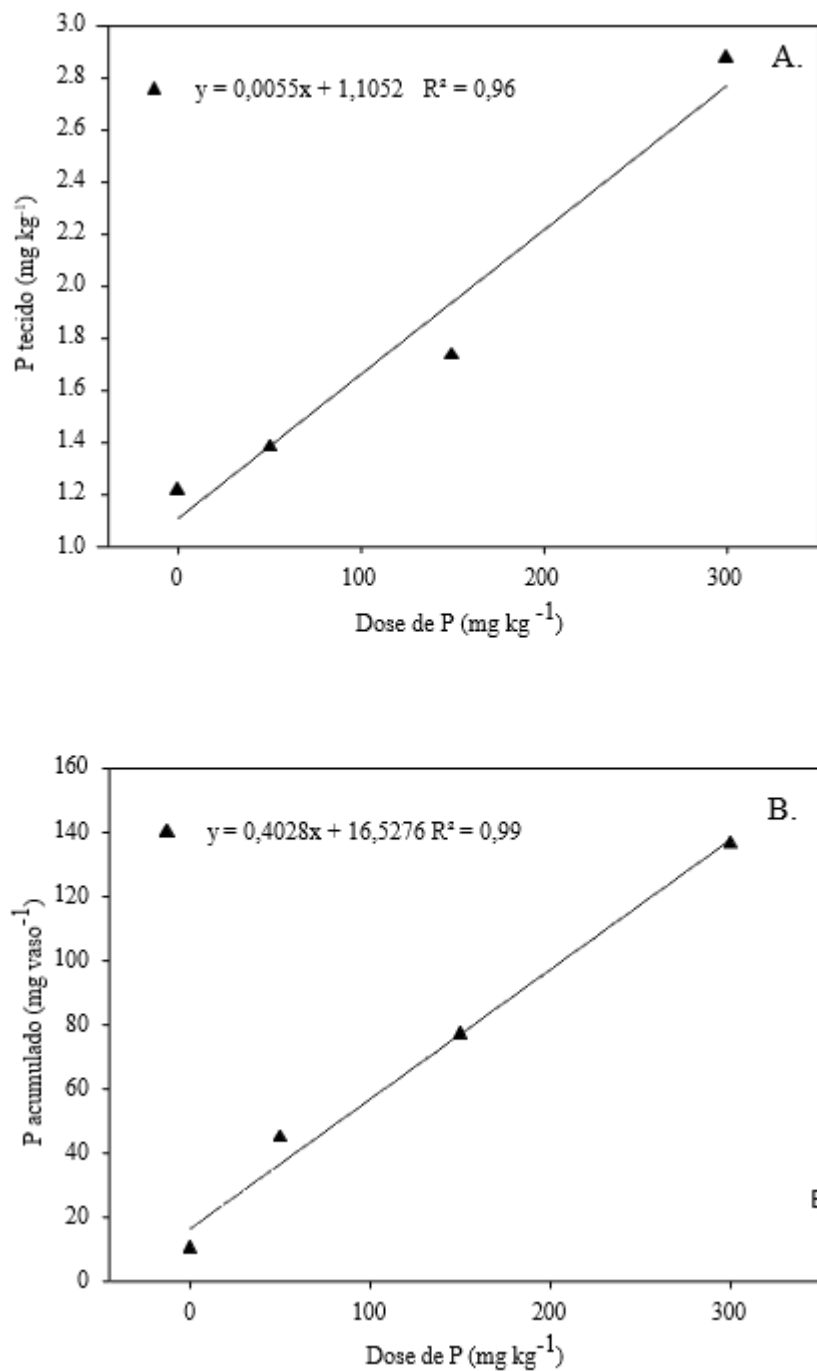
Foram ajustadas equações de regressão que estimam o P acumulado na parte aérea da planta como variável o teor de P do solo avaliado pelos extratores, considerando todos os solos. Na maioria dos estudos que comparam ou selecionam extratores de fósforo, é comum utilizar a correlação entre o fósforo absorvido e acumulado pela planta teste, cultivada em condições de casa de vegetação, e a quantidade de fósforo no solo extraído pelos extratores, conforme Silva e Raij (1999). Esta abordagem busca estabelecer uma relação entre a disponibilidade de fósforo no solo medida pelos extratores e a capacidade das plantas em absorver e acumular esse nutriente, proporcionando uma base para selecionar os extratores mais adequados.

Figura 2 - Teor de fósforo (A) e fósforo acumulado (B) na parte aérea de plantas de milho em função de doses de P em Gleissolo.



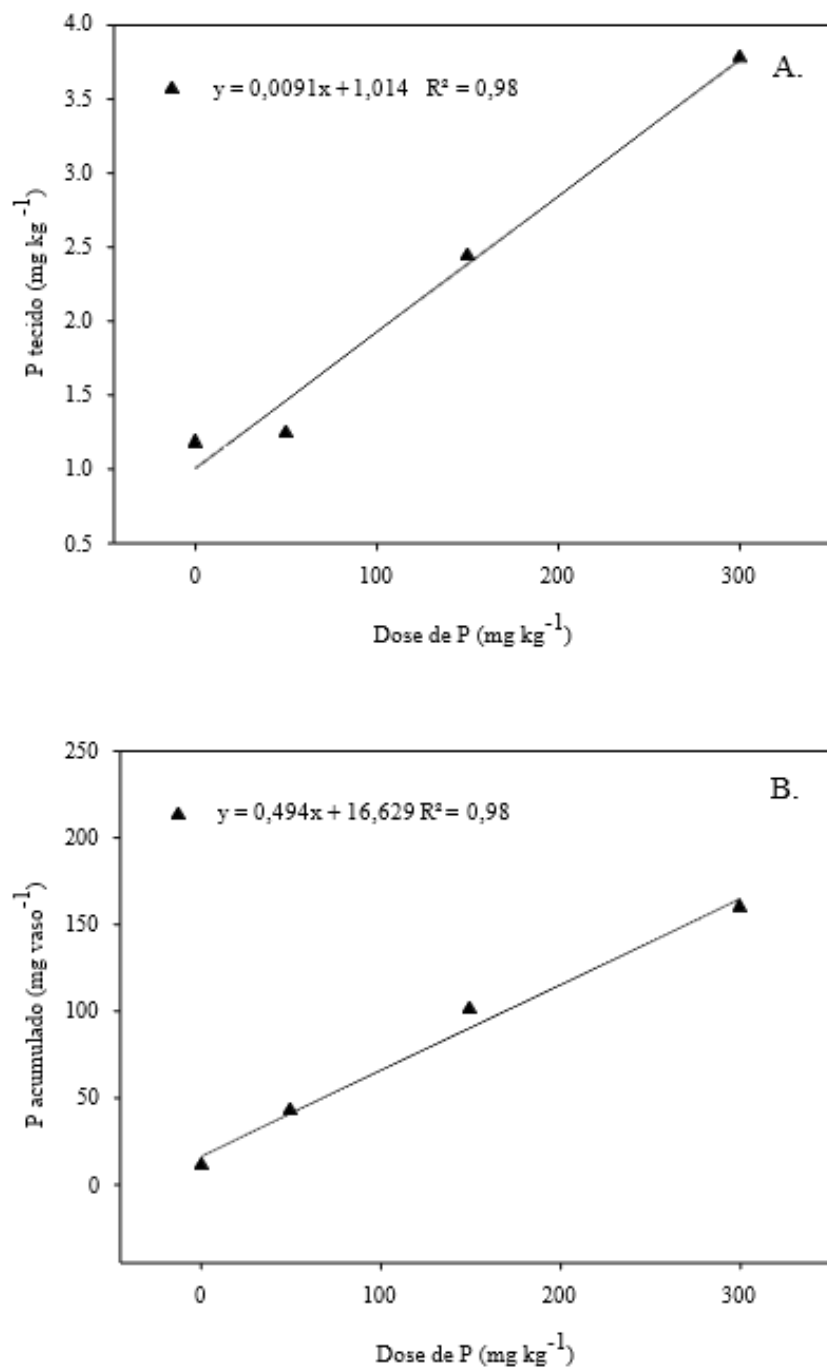
Fonte: Próprio autor.

Figura 3 - Teor de fósforo (A) e fósforo acumulado (B) na parte aérea de plantas de milho em função de doses de P em Latossolo.



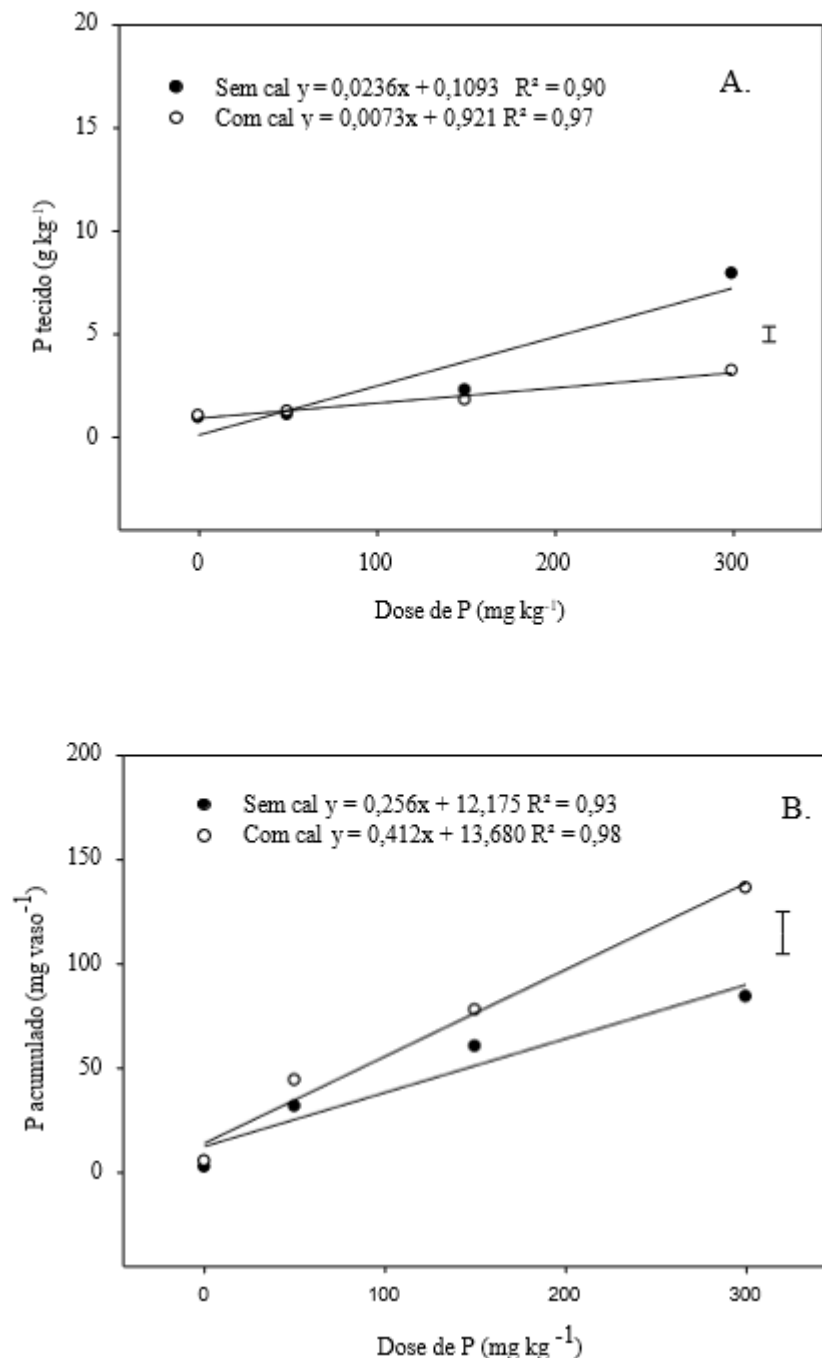
Fonte: Próprio autor.

Figura 4 - Teor de fósforo (A) e fósforo acumulado (B) na parte aérea de plantas de milho em função de doses de P em Argissolo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5 - Teor de fósforo (A) e fósforo acumulado (B) na parte aérea de plantas de milho em função de doses de P com e sem calcário em Planossolo. Barra vertical indica a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de F em  $p < 0,05$ .



Fonte: Próprio autor.

O extrator M-1, considerando-se todas as unidades experimentais obteve alto grau de correlação ( $r = 0,78^{**}$ ) com a absorção de P na parte aérea das plantas de milho (Figura 6A). No caso do extrator M-3, considerando-se todas as unidades experimentais, o grau de correlação foi o maior ( $r = 0,81^{**}$ ) (Figura 6B) e para RTA, foi menor,  $r = 0,55^{**}$  (Figura 6C). Em trabalho semelhante com milho, Farias *et al.* (2009) demonstra que o coeficiente de correlação linear pode

variar de acordo com a classe de solo e é importante exercer uma cautela adicional ao interpretar a eficiência dos extratores de fósforo disponível em estudos que correlacionam métodos de análise de solos. Assim, a interpretação destes resultados requer uma análise cuidadosa para garantir uma compreensão precisa da disponibilidade de P no solo e sua relação com as necessidades das plantas.

No presente estudo quando os solos foram separados por classes os coeficientes de correlação aumentaram para os três extratores em relação da correlação obtida com todas as unidades experimentais, conforme tabela 2.

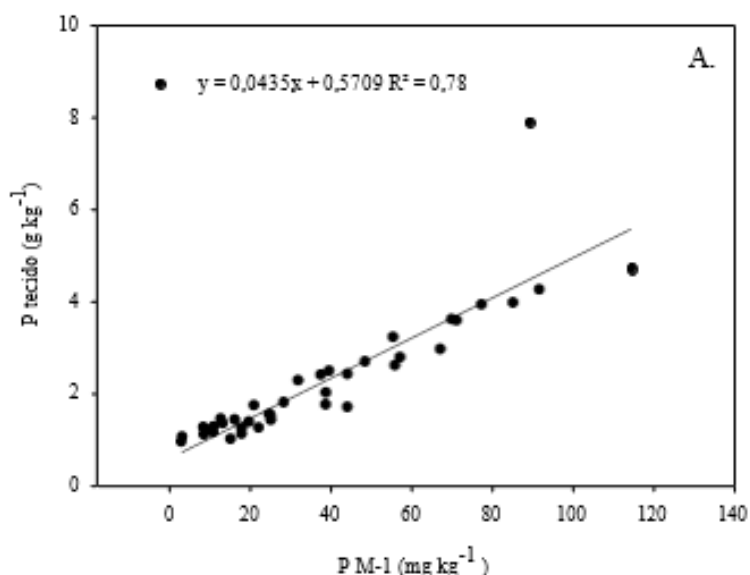
Tabela 2 - Coeficiente de correlação linear simples entre conteúdo de P da parte aérea de plantas de milho e o teor de P disponível pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions nos solos com todas as doses de P com e sem calcário.

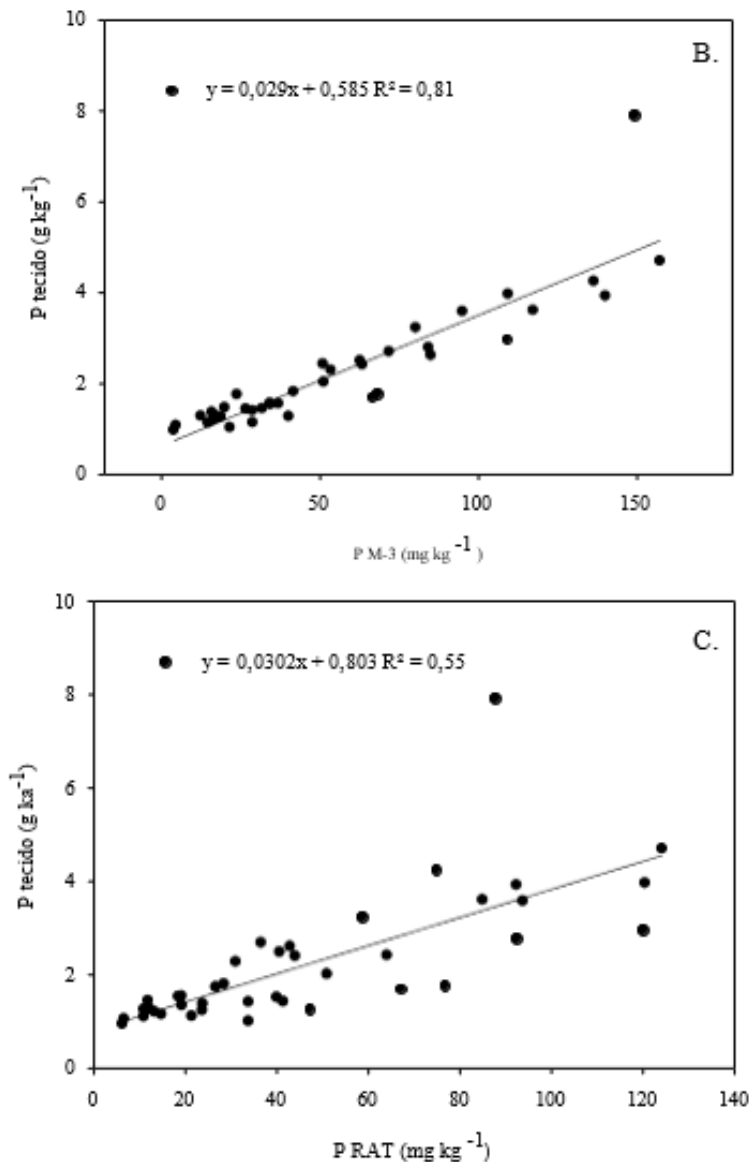
| Classe de solo |          |          |          |
|----------------|----------|----------|----------|
|                | M-1      | M-3      | RTA      |
| Gleissolo      | 0,9838** | 0,9861** | 0,9209** |
| Latossolo      | 0,8993*  | 0,8753*  | 0,8892*  |
| Planossolo     | 0,9078** | 0,9435** | 0,9015** |
| Argissolo      | 0,9826** | 0,9760** | 0,9670** |
| Nitossolo      | 0,9727** | 0,9740** | 0,9660** |

\*, \*\* significativo a 5 e 1 % respectivamente.

Fonte: Próprio autor.

Figura 6 - Relação entre os teores de fósforo extraído do solo pela solução de M-1 (A) M-3 (B) RTA (C) e teores de fósforo na parte aérea das plantas de milho.





Fonte: Próprio autor.

Observou-se um aumento significativo na correlação para os extratores em todas as categorias, o que sugere uma maior sensibilidade desses extratores à capacidade tampão de P. Resultados semelhantes foram observados por Braida *et al.* (1996) durante a análise do desempenho dos extratores M-1 e RTA em dez solos no Rio Grande do Sul, com variações no teor de argila. Ao separar os solos com base no teor de argila, foram registrados coeficientes de correlação mais elevados tanto para o M-1 quanto para a RTA, embora o M-1 tenha apresentado aumentos relativos maiores. Isso respalda a decisão de classificar os solos em categorias com base em características associadas à capacidade tampão, semelhante ao que foi realizado para interpretar o teor de P pelo M-1 em solos de Minas Gerais, utilizando categorias de fósforo remanescente (P-rem) ou quantidade de argila, conforme Alvarez *et al.* (2000).

Os valores de coeficientes de correlação linear elevados para todos os extratores em cada

classe de solos avaliadas, indicam a eficácia desses extratores em estimar a disponibilidade desse elemento para as plantas. Estes resultados sugerem que todos os extratores M1, M3 e RTA foram eficientes na previsão da quantidade de fósforo disponível para as plantas nas diferentes classes de solo avaliadas do Paraguai.

Vale ressaltar algumas particularidades de cada extrator em relação a fonte de P aplicada Silva e Raij (1999) avaliando a eficiência de extratores de P em dois Latossolos do Rio Grande do Sul, verificaram que a fonte de P influencia significativamente as correlações entre o P extraído por diferentes métodos e o acúmulo desse elemento na parte aérea do feijoeiro. Foram observados coeficientes de correlação consideráveis entre o fósforo extraído pelo M-1 e o fósforo acumulado na parte aérea das plantas em solos que receberam tratamentos com fosfato solúvel (superfosfato triplo) ( $r = 0,94$ ) e fosfato de rocha natural de rocha de origem sedimentar (fosfato de Gafsa) ( $r = 0,99$ ). No entanto, quando um fosfato natural de rocha ígnea (fosfato de Araxá) foi utilizado, a correlação foi menos expressiva ( $r = 0,75$ ). Possivelmente esse fato deve ter ocorrido devido ao M-1 solubilizar resíduos que não estão prontamente disponíveis para as plantas, especialmente quando se empregam fontes de baixa solubilidade como os fosfatos naturais originados de rochas ígneas como verificado por Doll *et al.* (1960).

#### 4.3 CORRELAÇÕES ENTRE OS TEORES DE P DISPONÍVEL POR CADA EXTRATOR E O CONTEÚDO ACUMULADO DE P NAS PLANTAS DE MILHO.

A correlação entre os teores de fósforo extraído do solo pela solução de M-1 e conteúdo de fósforo acumulado pelo milho obteve  $r = 0,86$ , considerando-se todas as unidades experimentais. No caso do M-3 o coeficiente de determinação foi de  $r = 0,80$  e da RTA  $r = 0,74$ . Bortolon *et al.* (2009) também verificaram essas correlações sendo do extrator M-1 com  $r = 0,88$  e M-3 com  $r = 0,91$ . Farias *et al.* (2009) também obtiveram coeficiente de determinação elevados, geralmente acima de 0,90 para M-1, M-3 e RTA para os doze solos estudados. Entre os solos avaliados havia Argissolo, Latossolo e Planossolo, indicando a eficiência de todos esses extratores para estimar a disponibilidade de P para as plantas.

Steiner *et al.* (2012) constataram que os extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e Resina demonstraram eficácia similar na extração de P disponível em doze solos do estado do Paraná. A maior correlação entre o teor de fósforo extraído no solo com o conteúdo de fósforo nas plantas foi da RTA ( $r = 0,93$ ), seguida pelo M-3 ( $r = 0,90$ ).

Simões Neto *et al.* (2009) também compararam o desempenho dos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, e RTA na avaliação da disponibilidade de fósforo em solos representativos para o

cultivo da cana-de-açúcar no Nordeste brasileiro. E, também, observaram que os teores de fósforo determinados pelos três extratores apresentaram correlação positiva com o fósforo absorvido e acumulado nos componentes da parte aérea das plantas.

#### 4.4 NÍVEIS CRÍTICOS DE P NO SOLO.

Foi observada variação nos níveis críticos de P em função dos extratores (Tabela 3). Em média, os maiores níveis críticos foram obtidos com o extrator M-3 e os menores com M-1. A amplitude de variação dos níveis críticos foi de 40,08 a 66,57 mg dm<sup>-3</sup> para M-1, de 65,84 a 93,37 mg dm<sup>-3</sup> para M-3 e de 41,72 a 88,37 mg dm<sup>-3</sup> para RTA.

A ampla diversidade nos níveis críticos de fósforo encontrados pelos diferentes extratores é resultado não apenas das distintas capacidades tampão de P dos solos, mas também das disparidades na disponibilidade inicial desse elemento nos solos antes do início do cultivo.

Tabela 3 - Níveis críticos de P no solo pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions para solos do Paraguai.

| Solo                | Nível crítico |           |                            |
|---------------------|---------------|-----------|----------------------------|
|                     | Mehlich-1     | Mehlich-3 | Resina trocadora de ânions |
| mg dm <sup>-3</sup> |               |           |                            |
| Gleissolo           | 66,57         | 93,37     | 68,55                      |
| Latossolo           | 49,21         | 79,57     | 88,37                      |
| Planossolo          | 40,08         | 65,84     | 41,72                      |
| Argissolo           | 50,42         | 86,45     | 59,27                      |
| Nitossolo           | 54,6          | 68,04     | 75,57                      |
| Todos solos         | 57,47         | 81,6      | 77,15                      |
| Média               | 52,18         | 78,65     | 66,70                      |
| Desvio Padrão       | 6,73          | 9,37      | 12,96                      |
| CV (%)              | 13            | 12        | 19                         |

Fonte: Próprio autor.

Em geral, os níveis críticos determinados em estudos realizados em condições de casa de vegetação, utilizando cultivo em vasos, tendem a ser mais elevados do que aqueles obtidos em experimentos de campo, conforme Corrêa e Haag (1993). Isso ressalta a importância de conduzir experimentos de calibração em campo para estabelecer os níveis críticos e as taxas de recuperação de fósforo necessárias para definir as doses de recomendação segundo Alvarez *et al.* (2000).

Os altos níveis críticos de fósforo determinados em estudos de casa de vegetação são atribuíveis ao fato de que a dose de fósforo é aplicada ao volume total de solo. Nessas condições,

os níveis críticos só seriam consistentes com aqueles obtidos no campo se a amostragem no campo fosse restrita à região da cova ou do sulco de plantio. Portanto, os níveis críticos variam dependendo do método de extração, da cultura, das propriedades do solo, bem como do método de aplicação do nutriente e da técnica de amostragem do solo, segundo Alvarez *et al.* (2000) e Leite *et al.* (2006).

Níveis críticos de P em seis solos representativos da Paraíba foram determinados por Farias *et al.* (2009), sendo a ordem decrescente encontrada de  $RTA > M-3 > M-1$  para solos mais intemperizados, e  $M-3 > Resina > M-1$  para solos menos intemperizados. Bonfim *et al.* (2003), ao determinarem os níveis críticos de fósforo em seis solos da Zona da Mata de Pernambuco, que variavam em teores de argila, constataram que os menores níveis críticos de P no solo foram observados ao utilizar o método Mehlich-1, corroborando com o presente estudo.

A amplitude dos níveis críticos pode ser observada pelos coeficientes de variação (CV %) obtidos para os três extratores, com maiores CVs para resina e M-1 e menor para o M-3, similarmente ao encontrado por Reis *et al.* (2020). O coeficiente de variação pode ser empregado como uma métrica para avaliar a sensibilidade dos extratores à capacidade tampão (CT) do solo.

Quanto maior o CV, maior é a sensibilidade do extrator à CT. Ao calcular o CV para todos os solos, verificou-se que o extrator mais sensível, segundo este critério, foi a resina trocadora de ânions, enquanto o Mehlich-3 foi o menos sensível.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As soluções extratoras Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions mostraram-se eficazes na estimativa da disponibilidade de fósforo em solos do Paraguai, com altos coeficientes de correlação entre o fósforo extraído e o conteúdo de fósforo na parte aérea das plantas de milho.

Os níveis críticos de fósforo, ordenados quantitativamente para os cinco solos, seguiram a sequência: Mehlich-3 > RTA > Mehlich-1.

## REFERÊNCIAS

ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R.; DIAS, L.; OLIVEIRA, J. A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Boletim Informativo SBCS, v. 25, p. 27-32, 2000.

ANTONIADIS, V.; HATZIS, F.; BACHTSEVANIDIS, D.; KOUTROUBAS, S. D. Phosphorus availability in low-P and acidic soils as affected by liming and P addition. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 46, n. 10, p. 1288-1298, 2015.

BONFIM, E. M. D. S.; FREIRE, F. J.; SANTOS, M. V. F. D.; SILVA, T. J. A. D.; FREIRE, M. B. D. S. Avaliação de extratores para determinação de fósforo disponível de solos cultivados com

*Brachiaria brizantha*. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 25, n. 2, p. 323-328, 2003.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Interpretação de resultados analíticos de fósforo pelos extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2751-2756, 2008.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; SCHLINDWEIN, J. A. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo para o milho pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3. **Scientia Agraria**, v. 10, n. 4, p. 305- 312, 2009.

BRAIDA, J. A.; CAMARGO, F. O.; ROSSO, I. J.; GIANELLO, C.; MEURER, E. J. Comparação de métodos de determinação da disponibilidade de fósforo do solo para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, n. 2, p. 345–347, 1996.

BRASIL, E. C.; MURAOKA, T. Extratores de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 4, p. 599–606, 1997.  
CARMO, C. A. F. S.; ARAUJO, W. S.; BERNARDI, A. C. C.; SALDANHA, M. F. C. **Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 41p. (Circular Técnica, 6).

CORRÊA, L. A.; HAAG, H. P. Disponibilidade de fósforo pelos extratores de Mehlich 1 e Resina em Latossolo Vermelho Amarelo, álico cultivado com três gramíneas forrageiras. **Scientia Agricola**, v. 50, n. 2, p. 287–294, 1993.

DOLL, E. C.; MILLER, H. F.; FREEMAN, J. F. Initial and residual effects of rock phosphate and superphosphate1. **Agronomy Journal**, v. 52, n. 5, p. 247-250, 1960.

FARIAS, D. R.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, D.; ARRUDA, J. A.; HOFFMANN, R. B.; NOVAIS, R. F. Fósforo em solos representativos do estado da paraíba: II- disponibilidade de fósforo para plantas de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 633-646, 2009.

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, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **World fertilizer trends and outlook to 2018**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015. 53 p.  
FORNASARI, C. H.; ZANÃO JÚNIOR, L. A.; DAMACENO, F. M.; GARCIA, Y. J. A. Estimate of potential acidity using the pH SMP method in soils in the west Paraguay. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 55, n. 3, p. 1-9, 2023.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A.; TONON, B.; FARIAS, J.; OLIVEIRA, M. N.; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 137, p. 178-185, 2012.

GOROSTIAGA, O. L.; ERICO, E. G.; LLAMAS, P. A.; MOLINAS, A. S.; FRANCO, E. S.; GARCÍA, S.; RIOS, E. **Estudio de reconocimiento de suelos. Capacidad de uso de la tierra y propuesta de ordenamiento territorial preliminar de la región oriental del Paraguay**. Gobierno Del Paraguay - Ministerio de Agricultura y Ganadería, v. 1, p. 246, 1995.

- KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R. Global spread of conservation agriculture. **International Journal of Environmental Studies**, v. 76, n. 1, p. 29-51, 2019.
- LARSEN, S. Soil phosphorus. **Advances in Agronomy**, v. 19, p. 151-210, 1967.
- LANG, T.; MCKEE, M. The reinvasion of Ukraine threatens global food supplies. **The BMJ**, v. 376, p. 676, 2022.
- LEITE, P. B.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; GUARÇONI M., A. Níveis críticos de fósforo, para milho, em casa de vegetação, de acordo com a sua localização no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 3, p. 497-508, 2006.
- MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 15, n. 12, p. 1409-1416, 1984.
- MUMBACH, G. L.; OLIVEIRA, D. A.; GATIBONI, L.; WARMLING, M. I. Phosphorus extraction by Mehlich 1, Mehlich 3 and Anion Exchange Resin in soils with different clay contents. **Revista Ceres**, v. 65, p. 546-554, 2018.
- NACHTERGAELE, F. Soil taxonom-a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys: Second edition, by Soil Survey Staff, 1999, USDA–NRCS, Agriculture Handbook number 436, **Hardbound. Geoderma**, v. 99, p. 336–337, 2001.
- NOLLA, A.; ALVES, E. O. S.; SILVA, T. G.; BORDIN, A. V. Correção da acidez e disponibilização de fósforo e potássio em latossolo vermelho distrófico típico submetido à calagem incorporada e superficial. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 3, p. 2478-2487, 2020.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1999. 399 p.
- OLIVEIRA, L.; NUNES, R. S.; FIGUEIREDO, C. C.; REIN, T. A. Distribuição espacial das frações de fósforo do solo em um Latossolo argiloso submetido a estratégias de fertilização fosfatada de longo prazo. **Geoderma**, v. 418, 2022.
- 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.; SAMPLES, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Eds.) **The role of phosphorus in agriculture**. New Jersey, NY: Wiley Online Library, p. 361-410, 1980.
- PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; SOLTANGHEISI, A.; ROCHA, G. C.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L. Revelando o legado do fósforo no solo para promover a agricultura sustentável no Brasil. **Ciência Rep.**, v.10, p. 15615, 2020.
- RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônômico de Campinas, p. 285, 2001.
- RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A.; SILVA, N. M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 17, n. 5, p. 547-566, 1986.

REIS, J. V. D.; ALVAREZ, V. V. H.; DURIGAN, R. D.; PAULUCIO, R. B.; CANTARUTTI, R. B. Interpretation of soil phosphorus availability by ehlich-3 in soils with contrasting phosphorus buffering capacity. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p. 1-21, 2020.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa, p. 356, 2019.

SBCS/NEPAR. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo-Núcleo Estadual Paraná. 482 p.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. - Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. p. 627, 2009.

SILVA, F. C.; RAIJ, B. V. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 267-288, 1999.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 840- 848, 2009.

SOBRAL, L. F.; SILVEIRA, K. R.; VIANA, R. D. **Correlações entre os métodos Mehlich 1, Mehlich 3 e resina para análise de P e K em solos dos Tabuleiros Costeiros**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros. p. 16, 2008.

STEINER, F.; LANA, M. C.; ZOZ, T.; FRANDOLOSO, J. F.; FEY, R. Extraction methods and availability of phosphorus for soybean in soils from Paraná State, Brazil. **Ciências Agrárias**, v. 33, n. 3, p. 1005-1014, 2012.

TEIXEIRA, P. C.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Brasília - DF: Embrapa, p. 574, 2017.

WITHERS, P. J. A.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; DE CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R. G.; BENITES, V. M.; GATIBONI, L. C.; DE SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. S.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA, A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, p. 2537, 2018.