

## DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS AVALIADA POR DIFERENTES EXTRATORES<sup>1</sup>

FÁBIO CESAR DA SILVA<sup>2</sup> e BERNARDO VAN RAIJ<sup>3</sup>

RESUMO - O objetivo deste trabalho foi o estudo comparativo dos extratores mais importantes do fósforo do solo. É apresentada uma revisão da literatura sobre métodos de avaliação da disponibilidade de fósforo em solos. Os métodos considerados foram: resina trocadora de ânions, Olsen, Bray 1, Bray 2, Mehlich 1, Truog, Morgan, Égner, Água, CaCl<sub>2</sub> 0,01M, papel de filtro com hidróxido férrico, e as técnicas de troca isotópica, expressos como valor E e valor L. Nos trabalhos considerados, as comparações de métodos foram feitas com base em correlações entre o P absorvido pelas plantas e o P extraído do solo pelas diferentes técnicas. Inicialmente, foi feita uma comparação conjunta dos resultados de todos os trabalhos, considerando os coeficientes de determinação (r<sup>2</sup>). Os valores médios obtidos e o número de artigos em que o método foi testado, indicados entre parênteses, foram os seguintes: resina trocadora de ânions, 70% (34); valor E, 68% (16); valor L, 65% (8); Olsen, 54% (48); Bray 1, 50% (42); Mehlich 1, 46% (25); Égner, 44% (9); Bray 2, 42% (19); Água, 42% (15); Truog, 38% (13); CaCl<sub>2</sub>, 36% (13), e Morgan, 32% (13). O confronto dos diversos métodos em duplas, considerando-se os pares de resultados (r<sup>2</sup>) obtidos pelos extratores que foram testados conjuntamente, através de correlações lineares e contraste de médias (teste t), levou à conclusão de que o método da resina foi estatisticamente superior aos demais. O método da resina tem os seguintes aspectos favoráveis: (a) apresenta valores de coeficientes de determinação, para a correlação entre P absorvido por plantas e P no solo, consistentemente superiores aos dos demais métodos na maior parte dos 72 trabalhos revisados; (b) pode ser usado tanto em solos ácidos como alcalinos, o que não é o caso para outros extratores importantes; (c) revela, adequadamente, o efeito da calagem em aumentar a disponibilidade de P para as plantas, o que não acontece com os métodos Mehlich 1, Bray 1 e Olsen; (d) não superestima, como os extratores ácidos, a disponibilidade de P em solos tratados com fosfatos naturais; (e) é o que apresenta o melhor embasamento teórico para a determinação do chamado “fator quantidade” de P em solos, que é o mais importante índice da disponibilidade do nutriente.

Termos para indexação: fósforo no solo, extratores de fósforo.

---

<sup>1</sup> Aceito para publicação em 7 de abril de 1998.

<sup>2</sup> Eng. Agr., Dr., Embrapa-Centro Nacional de Pesquisa Tecnológica em Informática para Agricultura (CNPTIA), Campus da UNICAMP, Caixa Postal 6041, CEP 13083-970 Campinas, SP. Bolsista do CNPq. E-mail: fcesar@cnptia.embrapa.br

<sup>3</sup> Eng. Agr., Ph.D., Embrapa-Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento e Avaliação de Impacto Ambiental (CNPMA), Rodovia SP340, km 127,5, CEP 13820-000 Jaguariúna, SP. Bolsista do CNPq. E-mail: bvanraij@cnpma.embrapa.br

PHOSPHORUS AVAILABILITY IN SOILS,  
DETERMINED BY DIFFERENT EXTRACTING PROCEDURES

ABSTRACT - The objective of this paper was the comparative study of the most important extractors of soil phosphorus. It presents a literature review of papers that deal with methods of extraction for the evaluation of phosphorus availability in soils. The methods considered were: anion exchange resin, Olsen, Bray 1, Bray 2, Mehlich 1, Truog, Égner, water, 0,01M CaCl<sub>2</sub>, iron hydroxide impregnated filter paper (Pi) and the determinations of the E and L values. The comparison between results of soil analysis by different methods of phosphorus extraction in soils and phosphorus uptake by plants was initially made considering the coefficient of determination ( $r^2$ ) for several extractants. The following average values and corresponding numbers of articles in which the method was considered were obtained: resin, 70% (34); E value, 68% (16); L value, 65% (8); Olsen, 54% (48); Bray 1, 50% (42); Mehlich 1, 46% (25); Égner, 44% (9); Bray 2, 42% (19); Water, 42% (15); Truog, 38% (13); CaCl<sub>2</sub>, 36% (13), and Morgan, 32% (13). The comparison of several methods, considering the pairs of results ( $r^2$ ) obtained for the extractants, that were tested together through linear correlation and average contrasts (t student test), indicated that the resin method was statistically superior to the other methods. The resin method presents the following favorable features: (a) highest values for the determinations coefficients for the correlations between P uptake by plants and soil P by the different methods, as reviewed in 72 papers; (b) it can be used in both acid and alkaline soils, which is not the case for the other most commonly used methods; (c) it reveals adequately the effect of liming on the increase of P availability in soils for crops, which is not the case of Mehlich 1, Bray 1 and Olsen; (d) it does not overestimate P availability in soils treated with rock phosphates, as is the case of acid extractants; (e) it is the method with the best theoretical background.

Index terms: soil phosphorus, phosphorus extractants.

## INTRODUÇÃO

A análise do solo é o principal veículo de transferência de informações geradas pela pesquisa sobre adubação de culturas aos produtores. As recomendações de quantidades de adubos a aplicar dependem, em grande parte, da qualidade da diagnose do grau de deficiência de determinado elemento no solo proporcionada pelo método de análise. No caso do P, a situação é bastante complexa, pela grande variedade de métodos de extração do elemento em uso, o que, de certa forma, é um indicativo da complexidade do comportamento do elemento P no solo (Larsen, 1967), assim como da falta de concordância sobre qual seria o método mais adequado (Raij, 1978; Cabala-Rosand & Santana, 1983; Fixen & Grove, 1990; Silva, 1991).

Já no século passado a pesquisa mostrou que o teor total de P em solos não era um bom indicador da disponibilidade do elemento para as plantas e desencadeou a busca de extratores que melhor simulassem a ação das raízes das plantas, como foi o caso do ácido cítrico a 1% (Dyer, 1894). Em todo este

século, evoluíram os processos de extração de P do solo e avançaram os conceitos sobre a sua disponibilidade. Uma evolução considerável foi a conceituação dos fatores intensidade, quantidade, capacidade e difusão, que certamente balizou muitos estudos sobre a disponibilidade de P em solos (Schofield, 1955; Mattingly, 1965; Gunary & Sutton, 1967), e, de certo modo, orientou os estudos de métodos de extração. O emprego dos conceitos de intensidade (I) e capacidade (C) ofereceu melhor explicação sobre o comportamento do P no solo (Wild, 1964; Gunary & Sutton, 1967; Larsen, 1974; Cabala-Rosand & Santana, 1983). Foi importante, para a implementação dos novos conceitos relacionados à disponibilidade de P no solo, o uso do radioisótopo  $P^{32}$ , que permitiu determinar o chamado “P isotopicamente trocável” (McAuliffe et al., 1948; Larsen, 1952), também chamado de “fosfato lábil”, uma das mais importantes avaliações do “fator quantidade”, muitas vezes tomada como referência em trabalhos de pesquisa.

As plantas necessitam de suprimento contínuo de P na solução do solo, o “fator intensidade” (I), que depende de reposição do P lábil, representado pelo “fator quantidade” (Q), ou a reserva de P no solo (Gunary & Sutton, 1967). O “fator capacidade”, definido pela razão de equilíbrio entre a quantidade de P (Q) e o P em solução (I), é conhecido como “poder-tampão” de fosfato, que é uma medida da capacidade do solo em manter um nível determinado de P na solução (Beckett & White, 1964), levando em conta o fato de as plantas absorverem apenas o P que se encontra na solução do solo (Wild, 1964; Mattingly, 1965). A complexidade intrínseca à disponibilidade de P no solo é a razão da diversidade com que o assunto tem sido tratado nos trabalhos de pesquisa.

Dalal & Hallsworth (1976) realizaram um estudo minucioso sobre a influência dos fatores quantidade, intensidade, capacidade e também difusão na absorção de P pelo trigo, concluindo que o fator isolado mais importante foi o fator quantidade, com um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,75. Todavia, deve ser lembrado que a quantidade de P absorvido pelas plantas, além de ser afetada por fatores edáficos, pode variar, também, em função de diferenças em capacidade de extração do nutriente do solo entre espécies ou cultivares (Gomes & Braga, 1980), da fase de crescimento das plantas (Fageria, 1990) e de outras características das plantas, tais como a densidade das raízes, volume radicular e mudanças químicas na interface solo-raiz (Barber, 1979).

A discussão apresentada mostra a complexidade do comportamento do P em solos, o que certamente tem muito a ver com a falta de concordância sobre métodos de determinação visando avaliar a disponibilidade de P em solos. Os métodos de análise de solo mais utilizados procuram, em geral, avaliar preferencialmente o fator quantidade (Wild, 1964; Mattingly, 1965; Raij, 1978), que é o parâmetro do solo mais importante para explicar a maior parte da variação do efeito de P do solo sobre as culturas (Gunary & Sutton, 1967; Raij, 1978; Cabala-Rosand & Santana, 1983).

O objetivo deste trabalho foi o estudo comparativo dos extratores mais importantes de P do solo.

## MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE FÓSFORO

Na Tabela 1 estão listados os métodos mais utilizados na avaliação da disponibilidade de P no solo e outros de interesse em trabalhos de pesquisa. Esses trabalhos podem ser distribuídos em sete grupos, quatro dos quais foram descritos por Kamprath & Watson (1980), acrescentando-se, neste trabalho, a resina trocadora de íons, o papel de filtro tratado com hidróxido de ferro, e os métodos que empregam troca isotópica. A classificação tem como base a reação das soluções, as ações específicas dos ânions e o material adsorvente de P, nos dois últimos casos (Larsen, 1967; Thomas & Peaslee, 1973; Kamprath & Watson, 1980).

### Soluções diluídas de ácidos fortes

As primeiras soluções extratoras utilizadas empregavam ácidos fortes em altas concentrações, a exemplo do ácido nítrico a 20% (Dyer, 1894), que não apresentou boa correlação com o P absorvido pelas plantas. Posteriormente,

**TABELA 1. Resumo dos principais métodos para análise de fósforo considerados na literatura, até 1977 e atualizada.**

Título abreviado	Solução extratora ou processo	Número de trabalhos com utilização do método		Métodos originais
		Até 1977 <sup>1</sup>	Após 1977 <sup>2</sup>	
Resina	Adsorção de P pela resina trocadora de ânions colocada em suspensão de solo em água	16	34	Cooke & Hislop (1963), Amer et al. (1955)
Olsen	NaHCO <sub>3</sub> 0,5N a pH 8,5	32	48	Olsen et al. (1954)
Bray 1	NH <sub>4</sub> F 0,03N em HC1 0,025N	29	42	Bray & Kurtz (1945)
Bray 2	NH <sub>4</sub> F 0,03N em HC1 0,10N	14	19	Bray & Kurtz (1945)
Mehlich 1	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,025N em HC1 0,05N	12	25	Nelson et al. (1953)
Truog	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,002N tamponado com sulfato de amônio a pH 4,8	10	13	Truog (1930)
Morgan	Acetato de sódio 0,75N em ácido acético 0,5N a pH 4,8	13	13	Morgan (1937)
Égner	Lactato de amônio 0,1N em ácido acético 0,4N a pH 4,0	8	9	Égner et al. (1960)
Água	Água destilada	12	15	Schofield (1955)
CaCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub> 0,01M	9	13	Schofield (1955)
Valor E	Troca isotópica com <sup>32</sup> P sem uso da planta	12	16	McAuliffe et al. (1948)
Valor L	Troca isotópica com <sup>32</sup> P com uso da planta	6	8	Larsen (1952)
Papel Fe	Papel de filtro impregnado com Fe (OH) <sub>3</sub> precipitado	0	4	Menon et al. (1988)

<sup>1</sup> De um total de 43 trabalhos.

<sup>2</sup> De um total de 72 trabalhos.

foram utilizados ácidos fortes, HCl, HNO<sub>3</sub> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, em soluções de concentrações baixas, variando na faixa de 0,002 N a 0,075 N, com valores de pH em torno de 2 a 3. Os nitratos e os cloretos são menos eficazes na extração de P, por terem pequeno efeito restritivo no processo de readsorção dos fosfatos extraídos do solo em comparação ao sulfato, mais eficiente em soluções ácidas (Nelson et al., 1953).

Dentre as soluções ácidas, duas têm importância no Brasil, devido ao seu uso em laboratórios de análise de solo, como é caso do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025 N + HCl 0,05 N (Nelson et al., 1953), conhecido por método duplo ácido, Carolina do Norte e, mais recentemente, Mehlich 1, usado na maior parte dos laboratórios, e o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,05 N, introduzido por Catani & Gargantini (1954) e usado em rotina no Estado de São Paulo de 1965 até 1982. Os baixos teores de P no solo obtidos pelo método do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,05 N e as baixas correlações com a resposta à adubação fosfatada na cultura de cana-de-açúcar, levaram Bittencourt et al. (1978) a propor a mudança de concentração da solução, passando a usar o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5 N exclusivamente para essa cultura.

Na prática, esses extratores ácidos dissolvem 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), o que permite inferir serem os extratores ácidos menos indicados para solos de regiões tropicais úmidas com predominância de caulinita e de óxidos de ferro e de alumínio na fração argila e fosfatos adsorvidos nesses minerais. Isto é confirmado na prática, pois é comum a obtenção de resultados baixos, em solos argilosos que vêm sendo adubados com fosfatos solúveis em água ao longo dos anos e nos quais as culturas produzem bem, quando são usados os extratores ácidos; por outro lado, os resultados são excessivamente altos em solos que receberam aplicação de fosfatos naturais (Raij & Diest, 1980; Raij et al., 1986).

#### **Soluções diluídas de ácidos fortes adicionada com íon complexante**

A solução ácida com íon complexante mais empregada é a mistura de HCl e NH<sub>4</sub>F. O íon fluoreto forma um forte complexo com íons Al<sup>3+</sup> (Kamprath & Watson, 1980), liberando, assim, o P ligado ao metal. O P presente no solo como fosfato de cálcio, também é extraído, com a precipitação de fluoreto de cálcio. As concentrações utilizadas têm sido de 0,025 e 0,1 N para o HCl e de 0,03 N para o NH<sub>4</sub>F (Bray & Kurtz, 1945), resultando, respectivamente, nas soluções conhecidas como Bray 1 e Bray 2. Mehlich (1978) propôs, depois de 24 anos de uso do duplo ácido, a substituição desse extrator de P do solo por uma nova solução, com a seguinte composição: NH<sub>4</sub>Cl 0,2 N; HOAc 0,20 N; NH<sub>4</sub>F 0,015 N e HCl 0,012 N, com pH de aproximadamente 2,5 (Mehlich 2). Tal extrator tem sua ação, na extração de P, baseada na presença do íon fluoreto e na acidez da solução. Mehlich (1984) modificou novamente o método, gerando a última versão (Mehlich 3), diferenciando da anterior pela substituição do ânion cloreto pelo nitrato, para eliminar o efeito corrosivo de cloretos sobre instrumentos, e pela adição de EDTA para complexar micronutrientes. Esta solução apresenta a seguinte concentração de reagentes: CH<sub>3</sub>COOH 0,2 N; NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 0,025 N; NH<sub>4</sub>F 0,015 N; HNO<sub>3</sub> 0,013 N e EDTA 0,001 M.

### Soluções diluídas de ácidos fracos

Entre as soluções de ácidos fracos mais empregadas para a extração de P, contendo ou não sais, estão as que contêm ácido cítrico, láctico e acético. Neste grupo enquadram-se as soluções de ácido cítrico (Dyer, 1894), acetato de sódio 0,75 N em ácido acético 0,5 N a pH 4,8 (Morgan, 1937), e lactato de amônio 0,1 N em ácido acético 0,4 a pH 4,0 (Égner et al., 1960).

Os ânions orgânicos presentes nessas soluções têm influência sobre a extração através de dois mecanismos: a) os ânions citrato e lactato formam complexos com os cátions da superfície das partículas do solo, liberando o P; b) os ânions orgânicos substituem o P adsorvido no solo, reduzindo sua readsorção por bloquear os sítios de adsorção (Kamprath & Watson, 1980).

### Soluções alcalinas tamponadas

A solução alcalina tamponada mais comumente usada na extração de P é a de  $\text{NaHCO}_3$  0,5 N, desenvolvida para solos calcários por Olsen et al. (1954). O princípio do método é a liberação do P ligado a Fe e Al em pH elevado. O íon  $\text{HCO}_3^-$  atua substituindo o P adsorvido no solo e reduzindo a atividade de  $\text{Ca}^{2+}$  em solução.

### Resina trocadora de íons

A extração de P do solo através da adsorção em resina de troca aniônica foi proposta inicialmente por Amer et al. (1955). O método era considerado pouco adequado para análise de rotina, principalmente pelo longo período de agitação do solo com resina em suspensão aquosa, em geral de 16 horas, e pela etapa laboriosa de separação da resina do solo após a agitação. No passado, o método foi usado em análise de solo de rotina, apenas em um laboratório da Inglaterra (Cooke & Hislop, 1963), que já não o usa mais. Não obstante isso, a extração de P com a resina de troca aniônica tem recebido grande atenção em trabalhos de pesquisa, conforme mostra a revisão recente publicada por Skogley & Dobermann (1996). No Brasil o método descrito por Raij et al. (1986), simplificado e automatizado na etapa de separação da resina do solo, em que a extração de P, Ca, Mg e K é feita com mistura de resinas de troca aniônica e catiônica saturada com bicarbonato de sódio, vem tendo uso crescente em laboratórios de rotina de análise de solo (Raij et al., 1994).

A resina trocadora de ânions, empregada na análise de solo, é um produto comercializado na forma de pequenas esferas de diâmetro em torno de 1 mm ou menos, formando um sistema poroso devido a um arranjo matricial de cadeias de poliestireno. Graças à presença de grupos funcionais ( $-\text{NR}_3^+\text{OH}^-$ ) existentes nessas cadeias, o material comporta-se como base forte, estando, deste modo, dissociado em qualquer valor de pH.

O processo de extração do P tem lugar na suspensão aquosa de terra e resina, estabelecendo-se uma transferência do elemento para a resina, na qual o fosfato é adsorvido:

P lábil  $\longleftrightarrow$  ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) solução.

Quando se usa uma resina trocadora de ânions saturada com o ânion bicarbonato, tem-se:



A reação é de equilíbrio; entretanto, como a capacidade de troca de ânions da resina é muito alta, há a transferência do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  da solução para a resina. Para que isso ocorra, é necessário tempo suficiente de agitação da suspensão solo-água-resina. A agitação durante a noite, ou por 16 horas, permite uma extração próxima do total extraível pela resina (Moser et al., 1959). O processo tem semelhança com a absorção de P pelas plantas, caracterizado pela transferência do P lábil para a solução do solo e daí para as raízes. As reações seguintes caracterizam o equilíbrio do P em solução com o P lábil e mostram que a resina, tal como a raiz, caracteriza-se por ser um sumidouro de P da solução:



No caso da resina trocadora de íons isso é possível, pela alta capacidade de troca da resina, em comparação com as quantidades adsorvidas de P (Raij et al., 1986).

Esta técnica apresenta boa fundamentação teórica; suas principais vantagens são, segundo Raij et al. (1984, 1986): extração contínua, dentro do tempo de agitação usado, ocorrendo uma transferência do P da fase sólida do solo para a resina, em meio aquoso, de forma similar ao que ocorre no sistema solo-planta; não é utilizado nenhum reagente químico que poderia dissolver fosfatos não-lábeis; o pH da suspensão solo-resina é um pouco menor que 7, coincidindo com a faixa de maior disponibilidade dos fosfatos do solo; a presença de bicarbonato mantém o tamponamento da suspensão, favorecendo a reprodutibilidade de resultados e tornando-os menos influenciados por mudanças nas relações entre quantidades de solo, resina ou água (Sibbesen, 1978); a resina catiônica retira os cátions de maior valência da solução e reduz a força iônica do meio, o que favorece a dissolução do fosfato lábil.

O método da resina de Raij et al. (1986) utiliza a resina em forma de esferas com pouco mais de 0,4 mm de diâmetro e contempla as seguintes etapas: a) desagregação do solo, em suspensão com água, por agitação com bolinha de vidro; b) agitação do solo e resina saturado com bicarbonato de sódio, em suspensão aquosa, durante 16 horas; c) separação da resina do solo com o uso de peneiras; d) extração do P da resina e determinação analítica. Uma das alternativas mais promissoras para simplificar o método é o uso de resina em forma de membrana, o que permite, talvez, eliminar a etapa a e simplificar consideravelmente a etapa c (Schoenau & Huang, 1991; Miola et al., 1995).

### **Papel de filtro impregnado com hidróxido férrico (Papel-Fe)**

A extração de P do solo através da adsorção em papel de filtro tratado com hidróxido de ferro, representada por método do papel-Fe, é bastante recente (Menon et al., 1988, 1989a). Ela tem similaridade com o método da resina, a diferença estando no processo de adsorção. Neste caso é utilizada uma tira de papel de filtro impregnada de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  amorfo e a adsorção é tipicamente de troca de ligantes, ocorrendo a adsorção de fosfato em forma similar à que

ocorre na chamada “fixação” de P em solo. O processo exige, também, agitação durante um período longo, em geral durante a noite, da mesma forma como ocorre com a resina.

### **Técnicas de troca isotópicas (valores L e E)**

O valor E (E da primeira letra de “exchangeable”) é a medida da quantidade de um nutriente na superfície e na solução do solo, que é trocável com um íon quimicamente idêntico ( $^{32}\text{P}$ ), adicionado na solução (McAuliffe et al., 1948), o que foi designado, mais tarde, por Russell et al. (1954), como “fósforo isotopicamente trocável”.

O valor L (L de Larsen, 1952) constitui a quantidade de P no solo e na solução do solo, que é trocável com o íon quimicamente idêntico adicionado ao solo ( $^{32}\text{P}$ ), medida através da absorção do mesmo nutriente pela planta.

### **SELEÇÃO DE MÉTODOS: CRITÉRIOS E COMPARAÇÕES**

Na grande maioria dos trabalhos contemplados nesta revisão, para a comparação, ou “seleção”, dos extratores mais eficientes, os autores avaliaram os extratores de P através da correlação entre P absorvido pela planta, em ensaios de casa de vegetação, e P no solo, extraído pelos diferentes métodos. Foram adotados, portanto, na escolha dos vários trabalhos publicados sobre seleção de extratores de P, critérios semelhantes aos de Raij (1978). Usando os valores dos coeficientes de determinação ( $r^2$ ) entre as quantidades de P absorvido pelas plantas e os teores de P no solo, de um total de 72 trabalhos, os dados foram avaliados em conjunto ou de acordo com o pH do solo.

Os métodos considerados neste estudo, apresentados na Tabela 1, incluem outros publicados posteriormente, além dos dados de Raij (1978). Apenas os dados referidos a esse último período são apresentados neste trabalho (Tabela 2), mas foram considerados, também, nos cálculos, os dados tabulados pelo autor na revisão de 1978. Na comparação, deparou-se com a heterogeneidade dos dados, dada a desuniformidade do número de dados existentes sobre os vários métodos e a sua representatividade em termos estatísticos e de fertilidade dos solos. Como a combinação de extratores testados nos diversos trabalhos é variável, realizou-se uma análise estatística, fazendo a comparação dos diversos métodos, listados na Tabela 1, em duplas, considerando-se os coeficientes de determinação ( $r^2$ ) dos pares de resultados, em todos os casos em que os métodos foram testados conjuntamente (Raij, 1978).

Os dados foram agrupados na Fig. 1, apresentando-se, na parte superior, o número de trabalhos em que o método foi testado, e, na parte inferior, a média e o intervalo de confiança relativo aos valores de cada método de extração de P. Na Fig. 2 são apresentados, dentro de dois agrupamentos de solos, ácidos e alcalinos, os valores máximos, médios e mínimos dos coeficientes de determinação.

Pelo exame da Fig. 1 constata-se que os métodos mais estudados foram, em ordem decrescente, Olsen, Bray 1, resina e Mehlich 1, seguindo-se os demais

**TABELA 2. Demonstração da porcentagem de variação (R<sup>2</sup>) da resposta ao fósforo explicada pela análise do elemento em solos, em diversos estudos de seleção de métodos (período 1974/1991).**

Autor	Ano	Local	Solos	Porcentagem de variação explicada por parâmetros de P no solo										
				Resina	Olsen	Bray 1	Bray 2	Mehlich 1	Truog	Morgan	Égner	Água	CaCl <sub>2</sub>	Papel Fe
Magalhães	1974	Brasil	Ácidos	68	-	-	-	63	-	-	-	-	-	-
González et al.	1976	Venezuela	Ácidos	-	47	62	-	47	-	-	-	-	-	-
			Neutros	-	18	37	-	30	-	-	-	-	-	-
			Alcalinos	-	51	27	-	35	-	-	-	-	-	-
Abd El Aal & Römer	1978	Egito	Diversos	82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bowman et al.	1978	EUA	Calcários e neutros	85	78	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ellof & Laker	1978	EUA	Diversos	21	32	-	26	-	-	-	21	-	-	
Kadera & Boyle	1978	Nigéria	Diversos	66	12	19	-	-	46	-	-	30	-	
Sibbesen	1978	EUA	Diversos	90	86	-	-	-	39	-	-	-	51	
			Diversos	66	-	-	-	-	-	-	-	-	42	-
Massee et al.	1977	EUA	Diversos	60	60	-	-	-	-	-	-	-	-	
Holford	1980	EUA	Diversos	-	56	59	-	22	-	-	-	-	-	
Roche et al.	1980	EUA	Diversos	58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Rodriguez et al.	1980	Chile	Diversos	-	-	81	-	79	81	-	-	-	-	
Sanabria et al.	1981	Venezuela	Diversos	63	-	53	-	-	-	-	-	-	-	
Adepoju et al.	1982	EUA	Alcalinos	38 <sup>1</sup>	51 <sup>1</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	
			e neutros	38 <sup>2</sup>	62 <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	
				44 <sup>3</sup>	64 <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	

*continua...*

TABELA2. Continuação.

Autor	Ano	Local	Solos	Porcentagem de variação explicada por parâmetros de P no solo												
				Resina	Olsen	Bray 1	Bray 2	Mehlich 1	Truog	Morgan	Égner	Água	CaCl <sub>2</sub>	Papel Fe	V	
Ayodele et al.	1982	Nigéria	Ácidos <sup>4</sup>	-	62	66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cabala-Rosand & Wild	1982	Brasil	Ácidos	83	-	-	-	32	-	-	-	-	66	37	-	-
Bahia Filho et al.	1983	Brasil	Ácidos	-	-	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
McClean et al.	1983	EUA	Diversos	75	86	33	-	58	-	-	-	-	-	-	-	-
Muriuki & Barber	1983	EUA	Diversos	73	32	-	48	36	-	-	-	-	-	33	-	-
Aquino & Hanson	1984	EUA	Alcalinos	-	-	82	85	86	-	-	-	-	-	-	-	-
Holford & Cullis	1985	EUA	Ácidos	-	14	31	24	37	29	-	-	-	-	-	-	-
Fullin	1986	Brasil	Ácidos	91	-	93	91	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Grande et al.	1986	Brasil	Ácidos	96	-	-	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-
Menon et al.	1988	EUA	Diversos	40	66	54	24	17	-	-	-	22	-	-	26	-
Volkweiss & Corey	1988	Brasil	Ácidos	70	-	69	-	65	-	-	-	-	-	-	73 <sup>5</sup> 76 <sup>6</sup>	-
Menon et al.	1989a	EUA	Diversos	-	-	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88
Menon et al.	1989b	EUA	Diversos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60

<sup>1</sup> P acumulado na parte aérea (média).

<sup>2</sup> P acumulado nas raízes.

<sup>3</sup> P acumulado no total.

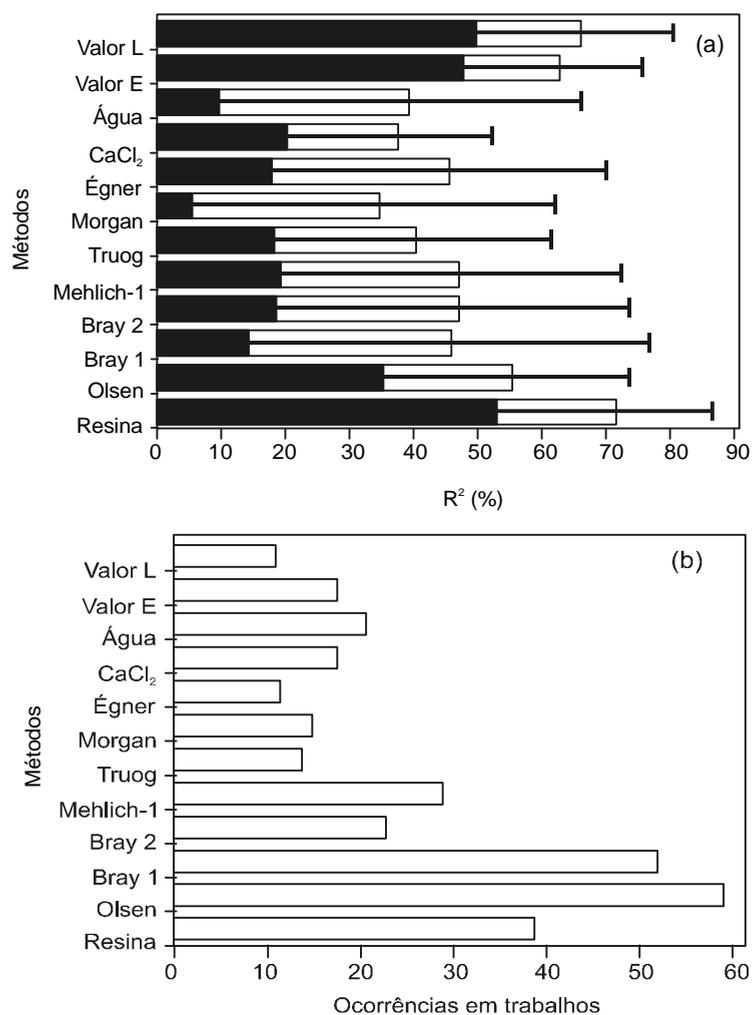
<sup>4</sup> Apenas parte dos dados citados.

<sup>5</sup> Difusão de P vertical.

<sup>6</sup> Difusão de P horizontal.

com ocorrências bem menores por trabalho. Destes quatro, merece destaque o interesse pelo método da resina, mesmo não sendo ele um método de uso generalizado em escala de rotina, como é o caso dos extratores Olsen, Mehlich 1 e Bray 1. O papel de filtro com  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  tem despertado interesse, recentemente (Tabela 2).

Na comparação dos coeficientes de determinação (Fig. 1), o método da resina é o que apresenta valores médios mais elevados, seguidos dos valores

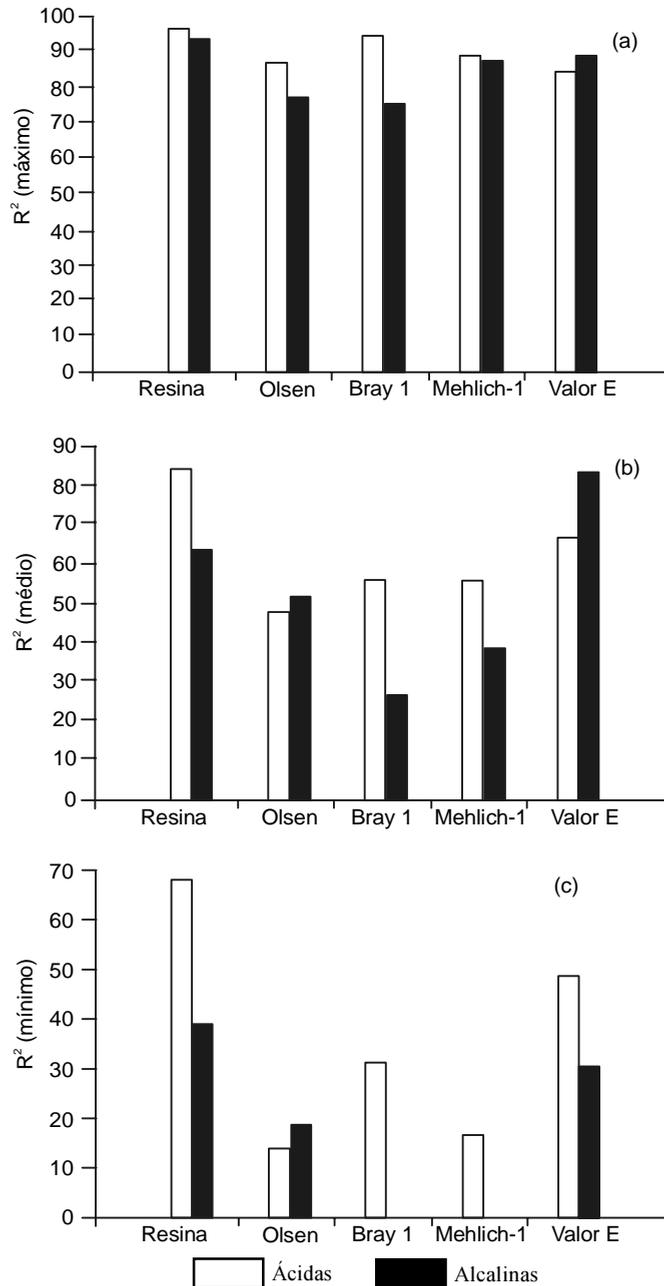


L II C  $\hat{m}$  LSIC

Intervalo de confiança para média geral dos valores de  $R^2$ , calculado pelo teste T a 5% de probabilidade. ( $L \leq C \leq \hat{m} \leq LSIC$ ).

**FIG. 1.** Demonstração: a) da porcentagem média de variação ( $R^2$  - %); b) da resposta a fósforo explicada pela análise do elemento em solos, no total de estudos ocorridos na seleção de métodos, no período de 1953 a 1991.

L e E. São apresentados os valores médios e os intervalos de confiança de cada método. Optou-se pelo uso da técnica de intervalo de confiança para a média geral dos valores de  $r^2$  de cada método, o qual foi calculado pelo



**FIG. 2.** Valores máximos (a), médios (b) e mínimos (c) da porcentagem de variação ( $R^2$ ) da resposta ao fósforo explicada pela análise do elemento em solos, considerando o pH do meio, pelos vários métodos.

teste t a 5% de probabilidade e admitindo um C.V. de 20% na população dos dados, semelhante ao conceito usado para definição do número mínimo de amostras de solo a se coletar para representar um talhão.

Cabe lembrar que esses dois últimos métodos (valores L e E) são inviáveis para uso rotineiro, restando, pois, a resina como melhor alternativa entre as estudadas, a qual é superior ao método Olsen. Fixen & Grove (1990) verificaram que, mesmo nos casos das correlações mais baixas, os valores dos coeficientes de determinação com relação ao método da resina ainda eram bastante elevados, ao contrário do que acontece em outros métodos, que podem apresentar coeficientes de determinação elevados, mas também muito baixos, próximos de zero, como se nota na Fig. 2c.

No grupo intermediário da Fig. 1 é evidente a similaridade dos métodos Mehlich 1, Bray 1, Bray 2 e Egner. São três métodos que envolvem princípios de extração diferentes, ou seja, ácidos fortes diluídos, complexação com fluoreto e ácido fraco tamponado, o que implica extração de diferentes formas de P, sem que isso tenha, aparentemente, afetado a qualidade da diagnose proporcionada pelos resultados de análise. O coeficiente de determinação é cerca de dois terços do valor da resina e, além disso, a amplitude de variação é muito maior, o que significa que, em parcela considerável dos casos, os métodos são de eficiência muito baixa. A diferença entre a resina e os outros métodos foi confirmada estatisticamente pelo teste T a 5% de probabilidade.

A diluição isotópica utilizando  $^{32}\text{P}$  é usada para determinar o P isotopicamente trocável, expresso de duas maneiras: valor E, uso apenas do solo e sem planta (McAuliffe et al., 1948), e valor L, utilizando-se do P marcado absorvido pela planta (Larsen, 1952). Os resultados obtidos eram considerados, no passado, como uma avaliação do P lábil ou do P disponível para as plantas. Contudo, a determinação, no caso do valor E, representa um equilíbrio estático e apenas no caso do valor L, por envolver a planta, a avaliação teria uma componente dinâmica, considerando que o resultado integra a absorção do nutriente pela planta.

De qualquer forma, esses dois métodos forneceram valores de coeficientes de determinação inferiores à resina (Fig. 1), o que, associado com a complexidade da técnica envolvendo o uso de isótopos radiativos, que exige medidas excepcionais de segurança, além de um tempo longo para a análise, invalidam o uso para determinação da disponibilidade de P em solos em escala de rotina.

Os dados apresentados na Tabela 2 sobre o papel de filtro saturado com  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  não permitem concluir sobre a eficácia do método, mas ressalta-se que em um caso (Menon et al., 1989a) o coeficiente de determinação obtido foi bastante baixo, inferior a de outros métodos, assim como Silva (1991) observou na cana-de-açúcar, enquanto no trabalho de Volkweiss & Corey (1988) o método foi um pouco superior ao método resina e aos métodos Bray 1 e Mehlich 1.

Uma característica importante, na seleção de um método de análise de P em solos, é a sua aplicabilidade em diferentes tipos de solos, principalmente no que se refere ao pH. Isto porque não é factível, em laboratórios de rotina, adotar diferentes métodos para grupos de solos com características variáveis. Os dados da Fig. 2 permitem fazer a comparação dos extratores levando em

conta o pH dos solos, estando os valores médios dos coeficientes de determinação separados em solos ácidos e alcalinos. No caso, foram comparados apenas os métodos resina, Olsen, Bray 1, Mehlich 1 e valor E.

Os resultados da Fig. 2 mostram o contraste dos métodos de determinação de P em solos, quando comparados entre solos ácidos ou alcalinos. Os resultados diferem dos apresentados anteriormente, na Fig. 1, já que não foram considerados os trabalhos em que os dados não puderam ser caracterizados como pertencentes a um desses dois grupos. A Fig. 2a evidencia que qualquer extrator pode ser bom para determinados agrupamentos de solos. No caso, qualquer um dos cinco métodos de extração forneceu valores elevados do coeficiente de determinação, nos casos dos valores máximos observados para cada um, tanto nos solos ácidos, como nos alcalinos. Este é um aspecto importante do ponto de vista prático, considerando que muitos laboratórios têm que analisar tanto amostras de solo ácidas como alcalinas.

Já os valores médios (Fig. 2b), mais representativos para caracterizar os métodos, por refletirem o conjunto disponível na literatura mundial, colocam em destaque os métodos da resina e do valor E, permitindo verificar um contraste para solos ácidos, nos quais a disponibilidade de P é melhor avaliada pela resina, enquanto acontece o contrário com os solos alcalinos, em que a determinação do valor E é mais eficaz. O extrator Olsen comportou-se de forma praticamente igual em solos ácidos e alcalinos, ao contrário do verificado por González et al. (1976), que consideraram o método melhor para solos calcários e alcalinos, devendo-se lembrar, ainda, que o método foi desenvolvido para ser usado em solos alcalinos (Olsen et al., 1954). Os métodos Bray 1 e Mehlich são mais eficazes em solos ácidos, e não indicados para solos alcalinos.

Ao comparar os valores mínimos dos coeficientes de determinação (Fig. 2b), percebe-se a baixa qualidade de previsão da disponibilidade de P que pode ser proporcionada pelos métodos Olsen, Bray 1 e Mehlich 1, devendo-se lembrar que os dados referem-se a um número considerável de solos. Neste caso, mesmo os métodos da resina e o valor E comportaram-se de forma pior em solos alcalinos, embora sendo bastante superiores aos três outros métodos.

Um outro aspecto diferente relacionado à disponibilidade de P e ao pH do solo foi abordado por Raij & Quaggio (1990). Os autores argumentaram que, em solos ácidos contendo grande quantidade de sítios de adsorção de P nos óxidos de ferro e alumínio, a calagem aumenta a disponibilidade de P para as plantas, o que foi constatado pela elevação dos teores de P em folhas de feijão, girassol e soja de quatro experimentos de campo (Tabela 3). Entretanto, o P determinado pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1 não indicou o efeito do calcário, e os resultados do método de Olsen deram uma correlação negativa com o P no solo; apenas o método da resina refletiu o comportamento da planta em termos da fitodisponibilidade de P no solo.

Para comparar as situações de solos onde as eficiências dos métodos são relativamente maiores, correlacionaram-se os valores de  $r^2$  em pares em que essas técnicas ocorriam no mesmo trabalho e calculados pelo teste t à probabilidade de 5%. Se considerarmos o método da resina como referência de

**TABELA3. Efeito da calagem no pH de solos, produções, teores de P em folhas e nos solos por diversos processos de extração<sup>1</sup>.**

Cultura	Nível de calagem <sup>2</sup>	pH em CaCl <sub>2</sub>	Produção (kg ha <sup>-1</sup> )	Teor de P nas folhas	P no solo (mg dm <sup>-3</sup> )			
					Mehlich 1	Bray 2	Olsen	Resina
Feijão	1	3,8d	1080a	0,244b	17a	20a	41a	33b
	2	4,2c	1530ab	0,321a	18a	21a	33b	36ab
	3	4,7b	1740b	0,325a	18a	23a	26c	38ab
	4	5,1a	1720b	0,326a	19a	18a	19d	43a
	5	5,2a	1780b	0,325a	20a	19a	21d	43a
Girassol	1	4,3c	900a	0,279c	12a	24a	17a	22b
	2	4,6c	1513b	0,327b	12a	22a	17a	25b
	3	5,3b	22058bc	0,381a	16a	25a	16a	33ab
	4	5,5ab	2055c	0,387a	15a	20a	12a	35a
	5	5,7a	2490c	0,380a	16a	20a	12a	37a
Soja	1	4,3a	1274a	0,185c	6a	15a	10a	13c
	2	4,8d	2020b	0,206bc	7a	16a	11a	16c
	3	5,5c	2308bc	0,244ab	5a	13a	7a	17bc
	4	6,1b	2649cd	0,226a	7a	17a	8a	22ab
	5	6,4a	2372d	0,255a	7a	15a	8a	27a
Soja	1	4,5d	1734a	0,235b	9a	20a	18a	16c
	2	4,9c	2246b	0,269ab	8a	22a	15ab	19bc
	3	6,1b	2483cb	0,288a	8a	20a	13ab	23b
	4	6,6a	2622c	0,285a	10a	24a	12b	34a

<sup>1</sup> Médias acompanhadas de letras distintas diferem, a 5% de probabilidade, no teste de Tukey (em cada um dos ensaios). Fonte: Raij & Quaggio (1990).

<sup>2</sup> Ensaio de feijão: 0, 6, 12, 18 e 24 t ha<sup>-1</sup>; ensaio de girassol: 0, 2, 4, 6 e 8 t ha<sup>-1</sup>; primeiro ensaio de soja: 0, 2, 4, 6 e 8 t ha<sup>-1</sup>; segundo ensaio de soja: 0, 3, 6 e 9 t ha<sup>-1</sup>.

“P disponível”, observam-se boas correlações (r) com o extrator Bray-2 e os valores E e L, que foram de 0,81, 0,67 e 0,57, respectivamente.

Já a técnica de Olsen, por sua vez, foi ainda bem correlacionada com o P em solos alcalinos e calcários extraído pelo Bray-2, Bray-1 e os valores de P isotopicamente trocável (L e E), tendo níveis de correlação de 0,74, 0,62, 0,69, 0,68, respectivamente. Tais resultados indicam que esses métodos têm uma eficiência semelhante em extrair P do solo, principalmente em solos alcalinos e calcários. Os métodos de Morgan, Truog, água e CaCl<sub>2</sub> apresentam baixas correlações com os valores obtidos com a resina e Olsen, em todas condições testadas, o que evidencia a baixa eficiência dos referidos métodos.

A confiabilidade, representatividade e exatidão do método podem ser avaliadas pelos testes estatísticos, através da técnica de intervalo de confiança em relação à média de r<sup>2</sup>, encontrada a partir dos trabalhos consultados e resumidos na Fig. 2, onde admitimos como aceitável coeficiente de variação da medida de 20% e o erro permitido de 5% de probabilidade, no teste t de student. Na prática, podemos dizer que os métodos teriam sua eficiência expressa em porcentagem de r<sup>2</sup> de resina (53 a 87), Olsen (35 a 73), Bray 1 (14 a 76), Bray 2 (19 a 73), Mehlich 1 (20 a 72), Truog (19 a 61), Morgan (5 a 62), Égner (18 a 70), CaCl<sub>2</sub> (20 a 52), água (10 a 66), Valor E (48 a 86) e Valor L (50 a 80).

Comparações de métodos em geral não são feitas em experimentos de campo, mas há algumas informações para essas situações. Assim, Raij et al.

(1986) obtiveram, em 28 experimentos de algodão, coeficientes de determinação entre P no solo e produções relativas, de 0,49 para a extração com  $H_2SO_4$  0,06 N, e de 0,71 para a resina trocadora de íons. Lins & Cox (1989), em cinco experimentos de adubação corretiva de longa duração, observaram coeficientes de determinação, quanto a teores de P no solo, e a dose ótima de P, de 0,67 para Mehlich 3, 0,57 para Bray 1 e 0,62, para a resina; quando a resina foi incluída em regressão múltipla, os valores aumentaram, respectivamente, para 0,84, 0,84 e 0,95.

Segundo Holford & Mattingly (1976), na avaliação da disponibilidade de P em solos, tem-se a dificuldade em medir, com um extrator químico, todo o P “disponível” no solo para as plantas, como também a impossibilidade de medir, com este mesmo extrator, o fator quantidade e a capacidade-tampão de P do solo.

Provavelmente, um dos principais fatores que vem motivando a mudança nos métodos de análise é o interesse na utilização de extratores multinutrientes, visando obter extratos para a determinação do maior número possível de elementos, inclusive micronutrientes (Raij, 1994). É o caso dos extratores conhecidos como Mehlich 3 (Mehlich, 1984) e AB-DTPA (Soltanpour & Swab, 1977), que vem tendo uso crescente como extratores multinutrientes, o primeiro em solos ácidos, o segundo em alcalinos, e a própria resina trocadora de íons (Raij, 1994; Skogley & Dobermann, 1996).

O método da resina, indiscutivelmente o melhor método para análise de P em solos, não é adotado em um maior número de laboratórios por causa de algumas dificuldades operacionais. No entanto, a técnica de extração pela resina modificada por Raij et al. (1986) possibilitou o uso em laboratórios de rotina, além de permitir a determinação, no mesmo extrato, de P, K, Ca e Mg do solo (Raij & Quaggio, 1983). Além de o método da resina ter sido mais eficiente para avaliar a disponibilidade de P para o algodoeiro, como já foi citado anteriormente, ele extraiu bem menos P de fosfatos naturais adicionados a solo, em comparação com o  $H_2SO_4$  0,05 N, que superestimou a disponibilidade de P nas amostras de solo tratados com esses adubos insolúveis em água, mas solúveis em ácidos (Raij et al., 1986). O mesmo método, em experimento de vasos com cultivo com arroz inundado, resultou em coeficientes de determinação de 0,960 com relação à resina, e de apenas 0,168 com relação ao método Mehlich 1 (Grande et al., 1986).

O uso do papel de filtro tratado com hidróxido de ferro mantém a etapa de agitação de 16 horas da resina, e no mais, seria similar à membrana de troca de íons, com a vantagem de o P não necessitar ser extraído em operação à parte, já que o papel, depois de receber o P por adsorção em  $Fe(OH)_3$ , é imerso diretamente nos reagentes utilizados na determinação de P. Contudo, ainda não se chegou a um procedimento satisfatório, por causa da dificuldade em preparar o papel de filtro impregnado com hidróxido férrico e protegê-lo do desgaste durante o processo de agitação (Guo et al., 1996). Além do mais, perde-se, neste método, a vantagem da presença do íon bicarbonato, que tampona o meio e favorece a extração de P (Sibbesen, 1978; Raij et al., 1986).

Na avaliação agrônômica de métodos de extração de P dos solos, o método da resina trocadora de íons supera os demais métodos existentes, na determi-

nação da disponibilidade de P no solo, pelas seguintes razões: apresenta valores de coeficientes de determinação, para a correlação entre P absorvido por plantas e P no solo, consistentemente superiores aos demais métodos, na maior parte dos trabalhos revisados; pode ser usado tanto em solos ácidos como em solos alcalinos, o que não é o caso dos outros extratores importantes; é o único método que revela adequadamente o efeito da calagem em aumentar a disponibilidade de P para as plantas; não superestima, como os extratores ácidos, a disponibilidade de P em solos tratados com fosfatos naturais; é o método que apresenta o melhor embasamento teórico para a determinação do chamado “fator quantidade” de P nos solos, que é o mais importante índice da disponibilidade do nutriente.

### REFERÊNCIAS

- ABDELALL, R.S.; RÖMER, W. Labile and anion extractable phosphate in calcareous soils and their suitability for characterizing the phosphate availability. **Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung Bodenkunde**, v.141, n.6, p.655-663, 1978.
- ADEPOJU, A.Y.; PRATT, P.F.; MATTIGOD, S.V. Availability and extractability of phosphorus from soils having residual phosphorus. **Soil Science Society of America. Journal**, Madison, v.46, n.3, p.583-588, May/June 1982.
- AMER, F.; BOULDIN, D.R.; BLACK, C.A.; DUKE, F.R. Characterization of soil phosphorus by anion-exchange resin adsorption and <sup>32</sup>P equilibration. **Plant and Soil**, The Hague, v.4, p.391-408, 1955.
- AQUINO, B.F.; HANSON, R.G. Soil phosphorus supplying capacity evaluated by plant removal and available phosphorus extraction. **Soil Science Society of America. Journal**, Madison, v.48, n.5, p.1091-1096, 1984.
- AYODELE, O.J.; AGBOOLA, A.; SOBULO, R.A. Evaluation of P sorption capacity and P extractants for assessing P requirements of maize Western Nigeria Savannah soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.13, n.4, p.295-307, 1982.
- BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M.; RIBEIRO, A.C.; NOVAIS, R.F. Sensibilidade de extratores químicos à capacidade de tampão de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, n.3, p.243-249, set./dez. 1983.
- BARBER, S.A. Growth requirements for nutrients in relation to demand of the root surface. In: HARLEY, J.L.; RUSSEL, S.R. (Eds.). **The soil-root interface**. London: Academic Press, 1979. p.5-20.
- BECKETT, P.H.T.; WHITE, R.E. Studies on the phosphate potentials of soils. III. The pool of labile inorganic phosphate. **Plant and Soil**, The Hague, v.21, p.253-282, 1964.
- BITTENCOURT, V.C.; ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO JUNIOR, E. Determination of available P for sugar cane in tropical soils by extraction with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5N. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 16., 1977, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: ISSCT, 1978. v.2, p.1175-1186.

- BOWMAN, R.A.; OLSEN, S.R.; WATANABE, F.S. Greenhouse evaluation of residual phosphate by four phosphorus methods in neutral and calcareous soils. **Soil Science Society of America. Journal**, Madison, v.42, n.3, p.451-454, May/June 1978.
- BRAY, R.H.; KURTZ, L.T. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. **Soil Science**, Baltimore, v.59, n.1, p.39-45, Jan./June 1945.
- CABALA-ROSAND, P.; SANTANA, M.B.M. Disponibilidade e diagnose de fósforo pela análise química do solo com referência ao Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, n.2, p.109-118, maio/ago. 1983.
- CABALA-ROSAND, P.; WILD, A. Direct use of low grade phosphate rock from Brasil as fertilizer. I. effect of reaction time in soil. **Plant and Soil**, The Hague, v.65, n.3, p.351-362, 1982.
- CATANI, R.A.; GARGANTINI, H. Extração do fósforo do solo pelo método de Neubauer e por métodos químicos. **Bragantia**, Campinas, v.13, n.4, p.55-62, 1954.
- COOKE, I.J.; HISLOP, J. Use of anion-exchange resin for the assessment of available soil phosphate. **Soil Science**, Baltimore, v.96, n.3, p.308-312, 1963.
- DALAL, R.C.; HALLSWORTH, E.G. Evaluation of the parameters of soil phosphorus availability factors in predicting yield response and phosphorus uptake. **Soil Science Society of America. Journal**, Madison, v.40, n.4, p.541-546, July/Aug. 1976.
- DYER, B. On the analytical determination of probable available mineral plant food in soils. **Transactions of the Chemical Society**, London, v.65, p.115-167, 1894.
- ÉGNER, H.; RIEHM, H.; DOMINGO, W.R. Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden. II. Chemische Extraktionmethoden zur Phosphor- und Kaliumbestimmung. **Kungliga Lantbrukshögskolans Annaler**, Stockholm, v.26, p.199-215, 1960.
- ELLOF, J.F.; LAKER, M.C. Phosphorus studies on vaalharts soils: II. the evaluation of method of P extraction, by correlation results with various wheat crop parameters. **Agrochemophysics**, New York, v.10, n.3, p.19-23, 1978.
- FAGERIA, N.K. Calibração de análise de fósforo para arroz em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.25, n.4, p.579-586, abr. 1990.
- FIXEN, P.E.; GROVE, J.H. Testing soils for phosphorus. In: WESTERMAN, R.L. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. 3.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1990. p.141-180.
- FULLIN, E.A. **Avaliação do fósforo disponível do solo pelo método da resina trocadora de ânions**. Viçosa : UFV, 1986. 76p. Dissertação de Mestrado.
- GOMES, J. de C.; BRAGA, J.M. Relação entre a capacidade tampão de fósforo de três Latossolos de Minas Gerais e a absorção diferencial de fósforo em três cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.). **Revista Ceres**, Viçosa, v.27, n.150, p.134-144, abr./maio 1980.

- GONZÁLES, T.R.; AVILAN, R.L.; LEON, L.C.; CHIRINOS, A.; ROJAS, D.E.I. Methods of analysis of phosphorus in soils of Portuguese studies in the greenhouse. **Agronomia Tropical**, Maracay, v.26, n.5, p.395-408, 1976.
- GRANDE, M.A.; CURTI, N.; QUAGGIO, J.A. Disponibilidade de fósforo pelos extratores de Mehlich e resina, em solos cultivados com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, n.1, p.45-50, jan./abr. 1986.
- GUNARY, D.; SUTTON, C.D. Soil factors affecting plant uptake of phosphate. **The Journal of Soil Science**, Oxford, v.18, n.1, p.167-173, Mar. 1967.
- GUO, F.; YOST, R.; JONES, R.C. Evaluating iron-impregnated paper strips for assessing available soil phosphorus. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.27, p.2561-2590, 1996.
- HOLFORD, I.C.R. Greenhouse evaluation of four phosphorus soil tests in relation to phosphate buffering and labile phosphate in soils. **Soil Science Society of America. Journal**, Madison, v.44, n.3, p.555-559, May/June 1980.
- HOLFORD, I.C.R.; CULLIS, B.R. An evaluation for eight soil phosphate extractants on acid wheat-growing soils. **Australian Journal of Soil Research**, East Melbourne, v.23, n.4, p.647-653, 1985.
- HOLFORD, I.C.R.; MATTINGLY, G.E.G. Phosphate adsorption and plant availability of phosphate. **Plant and Soil**, The Hague, v.44, p.377-389, 1976.
- KADERA, O.; BOYLE, J.R. Evaluation of phosphorus in forest soils: comparison of phosphorus uptake, extraction method and soil properties. **Plant and Soil**, The Hague, v.49, n.2, p.285-297, Apr. 1978.
- KAMPRATH, E.J.; WATSON, M.E. Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLES, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Coords.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p.433-469.
- LARSEN, S. Phosphorus: a limiting factors in future food production. **Netherlands Journal of Cultural Science**, Wageningen, v.22, p.270-274, 1974.
- LARSEN, S. Soil phosphorus. **Advances in Agronomy**, New York, v.19, p.151-210, 1967.
- LARSEN, S. The use of <sup>32</sup>P in studies on the uptake of phosphorus by plants. **Plant and Soil**, The Hague, v.4, n.1, p.1-10, 1952.
- LINS, I.D. G.; COX, F.R. Effect of extractant and selected soil properties on predicting the optimum phosphorus fertilizer rate for growing soybeans under field conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.20, p.319-333, 1989.
- MAGALHÃES, A.F. Uso de resina de troca aniônica na avaliação do fósforo “disponível” para as plantas: II. estudo comparativo com a solução de Mehlich (Carolina do Norte). **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.10, n.1, p.171-176, 1974.
- MASSEE, T.W.; OLSEN, R.A.; SKOGLEY, E.O. Characterizing soil fertility by ion diffusive flux measurements. **Plant and Soil**, The Hague, v.47, n.3, p.663-678, Aug. 1977.

- MATTINGLY, G.E.G. **The influence of intensity and capacity factors on the availability of soil phosphate.** Olso: Minist. Agriculture Fish. of Food, 1965. p.1-9. (Technical Bulletin, 13).
- McAULIFFE, C.D.; HALL, N.S.; DEAN, L.A.; HENDRICKS, S.B. Exchange reactions between phosphates and soils: hydroxolic surface of soil minerals. **Soil Science Society of America. Proceedings**, Madison, v.12, p.115-123, 1948.
- McCLEAN, E.O.; ARSCOTT, T.G.; HANNAN, M.A. An evaluation of soil solution and chemical extraction methods for assessing phosphorus availability to wheat plants grown in Ohio and Bangladesh soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.14, n.1, p.1-13, 1983.
- MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.15, n.12, p.1409-1416, 1984.
- MEHLICH, A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.9, n.6, p.477-492, 1978.
- MENON, R.G.; CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.L. Comparison of Bray I and Pi tests for evaluating plant-available phosphorus from soils treated with different partially acidulated phosphate rocks. **Plant and Soil**, The Hague, v.114, n.2, p.211-216, Feb. 1989a.
- MENON, R.G.; CHIEN, S.R.; HAMMOND, L.L. **The Pi soils phosphorus test: a new approach to testing for soil phosphorus.** Muscle Shoals: International Fertilizer Development Center, 1989b. 10p.
- MENON, R.G.; HAMMOND, L.L.; SISSING, H.H. Determination of plant-available phosphorus by the iron hydroxide-impregnated filter paper (Pi) soil test. **Soil Science Society of America. Journal**, Madison, v.53, n.1, p.110-115, Jan./Feb. 1988.
- MIOLA, G.R.; TEDESCO, M.J.; BISSANI, C.A.; GIANELLO, C. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo para as plantas através de membrana trocadora de ions. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995, Anais... Viçosa: SBCS/UFV, 1995. p.975-977.
- MORGAN, M.F. The universal soil testing system. **Communications in Agricultural Experimental Station Bulletin**, 392, 1937.
- MOSER, U.S.; SUTHERLAND, W.H.; BLACK, C.A. Evaluation of laboratory indexes of absorption of soil phosphorus by plants. **Plant and Soil**, The Hague, v.10, n.4, p.356-374, Apr. 1959.
- MURIUKI, S.K.; BARBER, R.G. A study on the merits of separating tropical soils into groups and using different chemical extractants for different groups in the routine measurement of available soil phosphorus. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.14, n.6, p.521-539, 1983.
- NELSON, W.L.; MEHLICH, A.; WINTERS, E. The development, evaluation and use of soil tests for phosphorus availability. In: PIERRE, W.H.; NORMAN, A.G. (Eds.). **Soil fertilizer phosphorus.** New York: Academic, 1953. p.153-188. (Agronomy, 14).

- OLSEN, S.R.; COLE, C.V.; WATENABE, F.S.; DEAN, L.A. **Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate**. Washington: USDA, 1954. 22p. (USDA. Circular, 939).
- 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. (Coords.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p.361-410.
- RAIJ, B. van. New diagnostic techniques, universal soil extractants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.25, n.7/8, p.799-816, 1994.
- RAIJ, B. van. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.2, n.1, p.1-9, jan./abr. 1978.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; PROCHNOW, L.I.; VITTI, G.C.; PEREIRA, H.S. Soil testing and plant analysis in Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.5, n.7/8, p.739-751, 1994.
- RAIJ, B. van; DIEST, A. Van. Phosphate supplying power of rock phosphate in an Oxisol. **Plant and Soil**, The Hague, v.55, n.1, p.97-104, 1980.
- RAIJ, B. van; FEITOSA, C.T.; SILVA, N.M. da. Comparação de quatro extratores de fósforo de solos. **Bragantia**, Campinas, v.43, n.1, p.17-29, 1984.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. Extractable phosphorus availability indexes as affected by liming. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.21, n.13/16, p.1267-1276, 1990.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análises de solos para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 31p. (IAC. Boletim técnico, 81).
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; SILVA, N.M. da. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.17, n.5, p.547-566, 1986.
- ROCHE, P.; GRIÈRE, L.; BABRE, D.; CALBA, H.; FALLAVIER, P. **Phosphorus in tropical soils: assessing deficiency levels and phosphorus**. Paris: World Phosphate Institute, 1980. 48p. (Scientific Publication, 2).
- RODRIGUEZ, S.J.; SILVA, H.E.; BERNIER, R.V.; SIERRA, C.B. Evaluation of chemical methods to assess soil P availability on soils of region: Chile. **Ciencia y Investigación Agraria**, v.7, n.3, p.229-236, 1980.
- SANABRIA, J.P.; CASTRO, J.L.; ZAMUZ, E.M. de. Calibración del método de análisis de suelos para determinar la fertilización fosfatada del trigo. **Investigaciones Agronómicas**, La Estanguela, v.2, n.1, p.74-79, 1981.
- SCHOENAU, J.J.; HUANG, W.Z. Anion-exchange membrane, water, and sodium bicarbonate extraction's as soil tests for phosphorus. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.22, p.465-492, 1991.
- SCHOFIELD, R.K. Can a precise meaning be given to "available" soil phosphorus. **Soils and Fertilizers**, Wallingford, v.18, p.373-375, 1955.
- SIBBESON, E. An investigation of the anion-exchange resin method for soil phosphate extraction. **Plant and Soil**, The Hague, v.50, n.2, p.305-321, Oct. 1978.

- SILVA, F.C. da. **Avaliação da disponibilidade de fósforo, por diversos extratores, em solos cultivados com cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. Piracicaba: USP-ESALQ, 1991. 165p. Dissertação de Mestrado.
- SKOGLEY, E.O.; DOBERMANN, A. Synthetic ion-exchange resins: soil and environment studies. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.25, n.1, p.13-24, 1996.
- SOLTANPOUR, P.N.; SWAB, A.P. A new soil test for simultaneous extraction of macro- and micro-nutrients in alkaline soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.8, p.195-207, 1977.
- THOMAS, G.W.; PEASLEE, D.E. Testing soils for phosphorus. In: WALSH, L.M.; BEATON, J.D. (Eds.). **Soil testing and plants analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1973. p.115-129.
- TRUOG, E. The determination of the readily available phosphorus of soils. **Journal of the American Society of Agronomy**, Madison, v.22, n.10, p.874-882, Oct. 1930.
- VOLKWEISS, S.J.; COREY, R.B. Método de extração de fósforo de solos controlados por difusão para avaliar sua disponibilidade para as plantas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 18., **Anais...** Guarapari: SBSC, 1988. p.20.
- WILD, A. Soluble phosphate in soil and uptake by plants. **Nature**, New York, v.203, n.4942, p.326-327, July 1964.