**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Avaliação e calibração de extratores de fósforo em três diferentes
ordens de solo da Costa Rica**

Róger Armando Fallas Corrales

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2013**

Róger Armando Fallas Corrales
Bachillerato en Ingeniería Agronómica con énfasis en Fitotecnia

Avaliação e calibração de extratores de fósforo em três diferentes ordens de solo da
Costa Rica

Orientador:
Prof. Dr. **TAKASHI MURAOKA**

Dissertação apresentada para obtenção do título
de Mestre em Ciências. Área de concentração:
Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2013

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Fallas Corrales, Róger Armando

Avaliação e calibração de extratores de fósforo em três diferentes ordens de solo da Costa Rica / Róger Armando Fallas Corrales.- - Piracicaba, 2013.
100 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Classificação do solo - Costa Rica 2. Extratores 3. Fósforo 4. Química do solo
6. Resina de troca iônica I. Título

CDD 631.41
F194a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao povo Brasileiro que me brindou a oportunidade de estudar e me acolheu com sua generosidade, a minha família que me apoiou na ideia de sair do meu país para lograr minhas metas, embora isso ocasionasse a distância física entre nós, e a minha esposa Laura pela ajuda nesta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao povo do Brasil e à CAPES pela bolsa concedida.

Ao Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas e ao professor Pablo Vidal Torrado pela oportunidade, ao meu orientador o professor Takashi por toda a ajuda no desenvolvimento do trabalho de pesquisa, e pelo trato amável e amigável que sempre oferece, além de toda a ajuda brindada na etapa de estabelecimento.

Ao CONICIT e MICIT, à Universidad de Costa Rica.

À professora Sonia Di Stefano Piedade e ao professor Marcos Camacho pela ajuda com a análise estatística de parte dos meus dados.

Aos meus colegas e amigos da salinha, pela ajuda tanto em temas relacionados ao trabalho de pesquisa, quanto pelos bons momentos, os quais alegraram a minha estadia no Brasil, em especial ao professor Marcos Camacho, Diogo Eberhardt e Rodrigo Coqui pela grande ajuda.

À professora Floria Bertsch pela ajuda e dicas na realização deste trabalho.

Ao Eng. Marco Corrales.

À banca examinadora pelo tempo dedicado e pelos comentários e sugestões para melhorar meu trabalho.

EPÍGRAFE***Nocturno sin patria***

Yo no quiero un cuchillo en manos de la patria.
Ni un cuchillo ni un rifle para nadie:
la tierra es para todos,
como el aire.

Me gustaría tener manos enormes,
Violentas y salvajes,
Para arrancar fronteras una a una
Y dejar de frontera sólo el aire.

Que nadie tenga tierra
Como se tiene traje:
Que todos tengan tierra
Como tienen el aire.

Cogería las guerras de la punta
Y no dejaría una en el paisaje
Y abriría la tierra para todos
Como si fuera el aire.
Que el aire no es de nadie, nadie, nadie...
Y todos tienen su parcela de aire.

Jorge Debravo

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 P no solo.....	17
2.2 P na planta.....	18
2.3 Absorção de P e relação solo-planta.....	19
2.4 Principais solos da Costa Rica e estudos com ênfase em P.....	20
2.5 Metodologias de análise para determinação do P disponível para as plantas...	23
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1 Amostragem e preparo das amostras.....	31
3.2 Caracterização química e análises dos solos.....	32
3.2.1 Análises de caracterização da fertilidade do solo (exceto P).....	32
3.2.2 Análises de P no solo.....	32
3.3 Experimento para a determinação da produção relativa, concentração e acúmulo de P em plantas de arroz.....	36
3.3.1 Estabelecimento dos tratamentos em vasos.....	36
3.3.2 Tratamentos.....	36
3.3.3 Produção relativa, concentração e acúmulo de P nas plantas de arroz cultivadas nos diferentes solos.....	37
3.4 Análise estatística.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1 Caracterização dos solos utilizados no estudo.....	39
4.1.1 pH em água.....	40
4.1.2 Bases (Ca, Mg e K) determinadas em KCl 1 mol L ⁻¹ e resina trocadora de íons.....	42
4.1.3 Acidez trocável (determinada com solução KCl 1 mol L ⁻¹).....	45
4.1.4 P total.....	47
4.1.5 Carbono.....	47
4.2 Resposta e comportamento dos extratores nos solos avaliados.....	48
4.2.1 Resultados da extração do P com os diferentes extratores.....	48

4.2.2 Correlação dos teores de P no solo com as variáveis resposta das plantas...	50
4.2.2.1 Análise para todos os solos em geral.....	50
4.2.2.2 Resposta da planta e correlação com os extratores para cada tipo de solo.....	59
4.2.2.2.1 Andisols.....	59
4.2.2.2.2 Inceptisols.....	66
4.2.2.2.3 Ultisols.....	73
4.2.3 Resposta do arroz à adição de P nos solos.....	79
4.3 Correlações entre as metodologias de extração de P.....	83
5 CONCLUSÕES.....	87
REFERÊNCIAS.....	89

RESUMO

Avaliação e calibração de extratores de fósforo em três diferentes ordens de solo de Costa Rica

Diferentes metodologias de determinação de fósforo no solo (P total, Bray 1, Mehlich 1, Mehlich 3, Olsen modificado, Resina de troca iônica, H3A-1 modificado e H3A-2 modificado) foram avaliadas e calibradas para seu uso em três distintas ordens de solos (Andisols, Inceptisols e Ultisols) coletados em diferentes lugares da Costa Rica. Aos resultados das análises de P e às outras variáveis químicas dos solos foram aplicadas análises de correlação, nas quais ressaltam o teor de Ca, Mg e Al como fatores relacionados ao P recuperado pelos diferentes extratores. Entre os resultados destacam as calibrações de uma modificação nas metodologias H3A-1 e H3A-2 com a resposta das plantas de arroz, metodologias que tinham sido testadas unicamente contra os resultados de outros extratores. Ao nível geral as metodologias Olsen modificada e à resina de troca iônica apresentaram-se como os extratores mais adequados quando não se faz distinção por tipo de solo ou ordem, mas foram encontradas diferenças no comportamento dos diferentes métodos de extração segundo o tipo de solo, podendo variar a conveniência de utilizar um método ou outro. Em geral as metodologias P total, Bray 1 e Mehlich 1 foram as que representaram em menor medida a resposta das plantas de arroz à condição de P nos solos do experimento de calibração. As metodologias de avaliação de P apresentaram correlação entre si, apresentando também variações se avaliadas para uma condição geral (todos os solos) ou diferenciando por ordens.

Palavras-chave: Extratores; P total; Bray 1; Mehlich 1; Mehlich 3; Olsen modificado; Resina de troca iônica; H3A-1 modificado; H3A-2 modificado; Andisol; Inceptisol; Ultisol

ABSTRACT

Evaluation and calibration of soil phosphorus extractants in 3 different soil orders from Costa Rica

Different soil phosphorus extraction methodologies (total phosphorus, Bray 1, Mehlich 1, Mehlich 3, modified Olsen, ion exchange resin, modified H3A-1 and modified H3A-2) were assessed and calibrated to evaluate its suitability to determinate the plant available phosphorus in different Costa Rican soils (Andisols, Inceptisols and Ultisols). The phosphorus results of these analyses were correlated against other soil chemical characteristics like pH, Ca, Mg and Al, in order to determinate which of these characteristics are related to the soil phosphorus content determined by the different extractants, were founded correlations of P with Al, Ca and Mg. As a results are presented for the first time the calibrations of the methodologies H3A-1 and H3A-2 (a modification) against phosphorus plant absorption and relative plant yield. In general conditions (all the soil orders) the modified Olsen method and the ion exchange resin method, resulted in better correlations with plant responses, therefore its seems to be the more suitable methods in this conditions. The analysis of the data by soil order, demonstrate some differences among extractants, that suggest the selective use of the methodologies and interpretation of results in accordance with soil order. In general total P, Bray 1 and Mehlich 1 were the less reliable methods to represent the rice plants response to the condition of soil phosphorus in this greenhouse calibration. Some of the assessed phosphorus methodologies present correlation among themselves, in both conditions (all soil orders in a group, or fractionated by soil order).

Keywords: Extractants; Total soil phosphorus; Bray 1; Mehlich 1; Mehlich 3; Olsen modified; Ion-exchange resin; H3A-1 modified; H3A-2 modified; Andisol; Inceptisol; Ultisol

1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um dos nutrientes vegetais mais importantes, tendo como funções ser constituinte de ácidos nucleicos, fosfolipídios e ATP, transferência de energia, ativação de algumas proteínas (enzimas), regulação de processos metabólicos, entre outras.

Embora as plantas absorvam pequenas quantidades de P em relação ao seu conteúdo total no solo, é comum em sistemas produtivos aplicar grandes quantidades de fertilizantes fosfatados, uma vez que o P no solo tem sua disponibilidade reduzida em função da grande quantidade de reações que este nutriente sofre como adsorção, precipitação, complexação e conversão a formas orgânicas.

Essas aplicações com grandes quantidades de P podem acarretar a contaminação da água mediante o processo de eutroficação, causando aumento na atividade biológica como resposta aos incrementos nas quantidades deste nutriente na água. Outro problema é que as fontes de fosfato no mundo são limitadas, razão pela qual será necessário aumentar a eficiência no uso do fertilizante fosfatado.

Devido a toda essa complexidade na absorção de P, riscos ambientais e carência de fontes que assegurassem a produtividade para as futuras gerações, ao longo do tempo têm sido desenvolvidos trabalhos para obter melhores métodos de avaliação de P, com os quais possam ser feitas melhores recomendações de adubação e com o menor impacto sobre o ambiente, como os extratores Olsen, Bray I e II, Mehlich I, II e III, resina de troca iônica e alguns outros como o método de papel impregnado com óxidos de Fe e Al, extração com EDTA, ou simplesmente com água.

Alguns destes métodos são bastante utilizados na rotina, por exemplo Fageria, Santos e Baligar (1997) mencionam que os extratores mais utilizados ao redor do mundo para avaliação de P são Mehlich I, Bray I e Olsen. No Brasil, na maioria dos estados, é utilizado o extrator Mehlich I e em São Paulo o método da resina de troca iônica (RAIJ et al., 2001). Na Costa Rica são utilizados como métodos de rotina para determinar P o extrator Olsen modificado (Diaz-Romeu; Hunter, 1978) e Mehlich III, os quais respondem às calibrações feitas por Cordero e Miner (1975) e Cabalceta (1994) para o extrator Olsen modificado e por Arias et al. (2003) e Cabalceta e Molina (2006) para o extrator Mehlich III.

Entre os extratores utilizados na Costa Rica o mais difundido é o Olsen modificado, método que inicialmente foi desenvolvido para extrair P disponível em solos com altos teores de Ca e Mg, porque o método Bray I (desenvolvido em 1945) subestimava os teores de P em solos calcários. Na Costa Rica o método de Olsen modificado também é utilizado em solos ácidos e com baixos teores de Ca e Mg. Atualmente, este extrator tem apresentado melhor correlação com a produtividade das culturas em diferentes ordens de solo do país.

Cabe destacar que tanto o método de resina quanto outros métodos desenvolvidos recentemente como o H3A-1 e o H3A-2, ainda não têm sido avaliados como possíveis métodos de rotina para a determinação de P em solos da Costa Rica, país que tem apresentado o interesse em adotar a resina como análise de rotina em algumas culturas, notadamente para café, citros e abacaxi. Surge, porém, a dúvida quanto à possibilidade de se utilizar as calibrações feitas em outros locais do mundo, quais os valores ou níveis críticos dos elementos (principalmente de P) para os solos da Costa Rica e se existe uma melhor correlação nessas condições com o rendimento das culturas.

Neste contexto os objetivos do trabalho foram: a) comparar diversos extratores para avaliação da disponibilidade de P em solos da Costa Rica, b) avaliar a efetividade dos diferentes extratores de P em relação às características químicas dos solos de Costa Rica, caracterizando variáveis que podem ser utilizadas na seleção do extrator, c) determinar a viabilidade da técnica de análise em resina de troca iônica, como método rotina para a avaliação de fósforo em alguns dos diferentes ordens de solos da Costa Rica, d) determinar o nível crítico de P nas ordens de solos com os diferentes extratores e comparar com literatura. Essas informações são muito importantes para uma melhor avaliação da fertilidade do solo, por tanto com grande impacto nas recomendações de adubação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 P no solo

O P é limitante em mais de 30% dos solos cultiváveis do mundo, sua eficiência é muito baixa quando aplicado no solo via fertilizantes, e as fontes de fácil acesso conhecidas estão sendo consumidas a uma velocidade que provavelmente gerará escassez destas matérias primas (RAGHOTHAMA, 1999; VANCE et al., 2003). Em sistemas agrícolas é comum observar grandes aplicações para culturas que precisam de quantidades relativamente pequenas do nutriente, o que demonstra a baixa eficiência no processo de transferência do P proveniente do fertilizante até ser absorvido pela planta (PLAXTON; TRAN, 2011).

Vários autores mencionam que o P se torna indisponível para as plantas porque rapidamente forma complexos insolúveis com cátions como Al e Fe em condições de solos ácidos e com Ca a maiores valores de pH (ABDÚ, 2006; HAYNES; MOKOLOBATE 2001, VANCE et al., 2003).

A solubilidade do P depende da K_a de dissociação do H_3PO_4 , variando sua forma em solução com as mudanças no pH, ocorrendo na faixa de pH entre 5,0 e 6,0 a maior absorção de P pelas plantas, faixa que o P é encontrado principalmente na forma $H_2PO_4^-$ (SCHACHTMAN et al., 1998). Sato e Commerford (2005) mencionam que tanto a adsorção quanto a desorção de fosfato também são afetadas pelo pH do solo, variando assim a capacidade de restituição do P absorvido pelas plantas no solo.

As deficiências de P na planta podem se manifestar por baixas concentrações na solução do solo, por baixas taxas de difusão e/ou por baixa capacidade de reposição dos níveis de fosfato em solução (RICHARDSON et al., 2005). Assim, alta quantidade de P no solo não significa necessariamente alto fornecimento do nutriente para a cultura.

Embora as formas orgânicas do nutriente sejam também de vital importância no fornecimento do P para as plantas, esse P ligado à matéria orgânica (MO) deve passar pelo processo de mineralização para ser absorvido e assimilado. Richardson et al. (2005) mencionam que o processo de mineralização está fortemente relacionado à absorção pela planta, sendo que em laboratório podem ocorrer taxas de mineralização de 1 a 4 mg de P kg solo⁻¹ dia⁻¹, o que evidencia a potencial importância da fração orgânica no fornecimento de P para as plantas. Não

Entretanto, o fornecimento de P a partir da mineralização da MO ainda carece de informações.

2.2 P na planta

Na planta o P é absorvido na forma de ortofosfato (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}), necessitando de um sistema de co-transporte com um cátion (SCHACHTMAN et al., 1998).

Uma vez absorvido, o P deve ser transportado e redistribuído internamente, sendo este processo regulado por uma série de proteínas de alta afinidade, denominadas “Pht1 family”, que funcionam geralmente em condições de baixo teor de P, enquanto que outras de baixa afinidade funcionam em condições onde não tem carência do nutriente para as plantas. Essas proteínas são ativadas segundo a genética da planta e sua relação com o ambiente (SCHACHTMAN et al., 1998; SMITH et al., 2003).

Em condições de baixa disponibilidade do P no solo as plantas com carência de P tendem a produzir uma maior quantidade de antocianinas, que atuam na proteção dos ácidos nucleicos da degradação pela radiação UV e, aos cloroplastos, diminuindo danos foto-inibitórios (PLAXTON; TRAN, 2011). Estas condições também podem propiciar a ativação dos transportadores de fosfato de alta afinidade já mencionados, por exemplo, o Pht1-1, o qual ajuda no acúmulo de reservas no caule.

A genética da planta tem um papel importante para superar deficiências do P no solo, por exemplo, Ticoni e Abel (2004) mencionam que em plantas de *Arabidopsis* expostas unicamente a fontes orgânicas (RNA) para o fornecimento de P, essas plantas ativam uma série de hidrolases (ribonucleases e fosfoesterases), as quais são capazes de reciclar o P das estruturas orgânicas e propiciar o crescimento sem a adição de fontes inorgânicas. Nesse mesmo estudo, as mutantes que não possuem essas hidrolases, não foram capazes de se desenvolver nesse meio, prescindindo da adição de fontes inorgânicas para crescer, o que evidencia a importância da genética na absorção de P. Plaxton e Tran (2011) também consideram que as plantas podem acessar a P da palhada ou da MO, a qual pode ser uma fonte importante de P em condições de deficiência.

Outro mecanismo conhecido que as plantas utilizam para superar as deficiências de P é a síntese e liberação de ácidos orgânicos, que acidificam a

rizosfera e quelatam os metais que geralmente atrapalham o P inorgânico (Pi) mediante as formas aniônicas dissociadas dos ácidos orgânicos, com o qual pode ser superada a baixa concentração do Pi na solução do solo (OBURGER et al., 2009; PLAXTON; TRAN, 2011).

Dentre as muitas funções realizadas na planta, o P tem importância em processos como síntese de ácidos nucleicos, fotossíntese, glicólise, respiração, síntese e estabilização da membrana, reações redox, ativação-inativação de enzimas, metabolismo de carboidratos e outros (VANCE et al., 2003), sendo portanto um dos nutrientes que mais contribuem para os componentes de produção.

2.3 Absorção de P e relação solo-planta

Como mencionado anteriormente o ortofosfato está presente no solo nas distintas formas do ácido ortofosfórico (H_3PO_4 , H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}) e como íon fosfato (PO_4^{3-}), sendo que a forma dominante em solução é altamente dependente do pH do solo (ABOU NOHRA et al., 2007). Estas formas influenciam a eficiência na absorção, por apresentarem diferentes graus de solubilização e capacidade de reação com outros elementos no solo.

Para Marschner (1995) o papel do pH na absorção de P pela planta não depende exclusivamente de fatores físicos relatados anteriormente, mas também da parte fisiológica que atua no aumento da absorção de ânions como fosfato e o nitrato, devido ao co-transporte próton-ânion do apoplasma ao citoplasma. Detalha ainda que quando mantiveram constante a forma de P (H_2PO_4^-) e promoveu variações no pH encontraram um maior efeito fisiológico por causa desse mecanismo.

O processo em que o P é retido para formas não lábeis pode ser definido como fixação de P pelos Oxidróxidos de Fe e Al, primeiramente por uma atração eletrostática e posteriormente pela troca de ligantes (OH^- e OH_2^+ por fosfato da solução), ficando o P fixado com uma maior força de retenção. A adsorção por aluminosilicatos ocorre de maneira semelhante aos oxidróxidos (NOVAIS et al., 2007).

Como mencionado, outra fonte importante de P no solo é a fração orgânica, maiores quantidades de MO representam geralmente uma maior reserva de fontes de P no solo, as quais mediante o processo de mineralização podem ficar

disponíveis para as plantas em diversos períodos de tempo, ajudando a dar estabilidade aos sistemas agrícolas e florestais. Raghothama (1999) menciona que o P orgânico pode representar entre 20 e 80% do P total do solo na capa arável, sua disponibilidade dependendo da taxa de degradação das estruturas orgânicas para formas inorgânicas assimiláveis (BALDWIN et al., 2005).

A principal forma de P orgânico no solo são os fosfatos de inositol, representando aproximadamente 50% do P orgânico do solo, sendo o myo-inositol hexakisfosfato (ácido fítico) o predominante, possivelmente porque apresenta uma maior sorção, o que representa maior dificuldade para sua degradação biótica e abiótica (CELI; BARBERIS, 2005), sua solubilização depende da atividade de enzimas como a fitase (RICHARDSON et al., 2005).

O P orgânico é, como o P inorgânico, adsorvido às estruturas dos colóides do solo, não sendo rapidamente disponível para as plantas (CELI; BARBERIS, 2005).

Como uma grande parte do P utilizado pelas plantas está relacionada ao P orgânico do solo, a interação com os microorganismos é de muita importância na mineralização e produção da MO, assim como a parte genética da planta mencionada anteriormente. Existe, por exemplo, uma relação entre as quantidades de P na solução do solo e as quantidades produzidas e excretadas da fosfatase no meio por parte dos organismos ocasionando um equilíbrio entre as quantidades disponíveis em solução e as quantidades totais do P no solo (OBERSON; JONER, 2005). Oehl et al. (2001), utilizando técnicas de esterilização do solo com radiação γ , encontraram que as fosfatases liberadas nos períodos anteriores à esterilização continuam exercendo a sua função embora não existissem organismos no solo nesse momento. Os autores relatam que isso poderia significar que o fornecimento de P para a recolonização após períodos que pudessem ocasionar a morte de organismos chave para os diferentes sistemas pode ser garantido mediante o efeito destas enzimas, tanto para sistemas agrícolas quanto para florestais.

2.4 Principais solos da Costa Rica e estudos com ênfase em P

Costa Rica é um pequeno país da América Central, mesmo assim possui uma grande diversidade de solos. Mata (1991)apud BERTSCH et al., (2000) mencionam que a maior parte do território é ocupada por solos do ordem Inceptisol (38,6%), Ultisol (21%), Andisol (14,4%), Entisol (12,4%), Alfisol (9,6%), e em menor proporção

pelas ordens Vertisol (1,6%), Mollisol (1,4%), Espodosol (0,2%), Oxisol (0,2%), Histosol (0,2%).

Figura 1 - Distribuição geográfica de Andisols (a), Inceptisols (b) e Ultisols e Alfisols (c) de Costa Rica (a partir de MATA (1991)apud BERTSCH et al., 2000)

Os solos de origem vulcânica de América Central foram descritos por Blasco (1976) sendo mencionadas algumas diferenças entre eles, por exemplo, que os solos vulcânicos de Costa Rica, mesmo sendo solos novos originários de constantes deposições de material vulcânico, apresentam uma marcada acidez, o qual os diferencia dos Andisols do resto da América Central. O mesmo autor menciona que essa acidez dos solos centro-americanos aumenta conforme o regime pluviométrico e conforme ao teor de matéria orgânica.

O teor de matéria orgânica nos solos de origem vulcânica é normalmente alto, possivelmente pela formação de compostos organominerais entre o material amorfo e a matéria orgânica (MO), portanto esta fração orgânica neste tipo de solo possivelmente possui uma grande importância na ciclagem e fornecimento de P para as plantas. Henríquez et al. (1992), estudando o fracionamento de P orgânico (Po) em diferentes ordens de solos de Costa Rica, relatam que o Po corresponde a mais de um 40% do P total na maioria dos solos avaliados, denotando o potencial aporte que poderia ter esta fração para a nutrição das plantas.

Os mesmos autores (HENRÍQUEZ et al., 1992) relatam que tanto para os solos da ordem Andisol, quanto para os da ordem Inceptisol testados, os teores de Po moderadamente lábil (extraídos com H_2SO_4) representam a maior fração do P orgânico, enquanto que para os solos da ordem "Ultisol" as maiores frações do Po corresponderam à fração lábil e à fração moderadamente resistente. Os autores enfatizam na importância que poderiam ter as frações orgânicas na nutrição das plantas a curto prazo nos solos desta última ordem (Ultisol).

Martini (1976), estudando solos vulcânicos com diferentes níveis de intemperização, constatou que conforme aumenta o grau de intemperismo no solo e os materiais amorfos começam a ser mais cristalinos, a matéria orgânica que ficava associada a esses materiais se torna mais susceptível à degradação, tendo como consequência uma diminuição do teor de MO e a diminuição na CTC do solo. O autor menciona também uma menor capacidade de retenção de P associada à menor quantidade de material amorfo.

Em alguns dos experimentos sobre adubação fosfatada em solos de origem vulcânica de Costa Rica, têm sido observadas marcadas respostas ao fornecimento deste nutriente, possivelmente pela alta retenção do nutriente nos minerais destes solos. Alvarado e Buol ([19__?]), trabalhando com a retenção de fosfatos em solos de origem vulcânica observaram que a média de retenção de fosfatos nesses solos era de aproximadamente 78% da quantidade aplicada, esse valor coincidindo com os valores encontrados por Cabalceta (1993), os quais ficaram em torno de 80% para solos intemperizados e os solos vulcânicos de Costa Rica, diferenciando-se dos solos da ordem Inceptisol, que apresentaram uma menor retenção.

Alvarado et al. (2009), aplicando altas doses de P em um Andisol de Costa Rica, constataram que quase não houve efeito residual do nutriente, sendo necessária a aplicação de $450 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ durante 2 anos consecutivos para obter um pequeno efeito residual. Os autores notaram também que para se obter boas produtividades na cultura da batata nesse Andisol é necessário realizar aplicações anuais devido à alta retenção do fosfato que apresenta esse solo.

Estudos realizados em ecossistemas de solos aluviais de origem basáltico na região Atlântica de Costa Rica tem avaliado também a disponibilidade de N e P, e tem identificado esses nutrientes como limitantes nos ecossistemas desenvolvidos sobre esses solos (VITOUSEK; DENSLOW, 1987).

No estudo de Vitousek e Denslow (1987), cabe resaltar a ampla variabilidade de solos que existem na Costa Rica, onde naturalmente em uma pequena área ("Estación Biológica La Selva") são encontrados solos com origens em épocas diferentes, portanto com diferentes graus de intemperismo, e como relatado no estudo com diferentes teores de P no solo, o que condiciona a produtividade desses ecossistemas, essa situação poderia ser relacionada com a variabilidade encontrada nas áreas dedicadas à produção agrícola do país.

Molina e Rodríguez (2012) trabalhando em um Inceptisol com um teor de P no solo teoricamente adequado (18 mg P L^{-1} em extrator Olsen modificado), obtiveram resposta significativa à aplicação de P para a cultura do arroz em Guanacaste, Costa Rica. Também em Inceptisols, mas contaminados com Cu na zona sul de Costa Rica, Pérez e Bornemisza (1986) constataram que as aplicações de fosfato atenuaram os efeitos negativos da alta concentração de Cu para as plantas de sorgo.

Especificamente para Ultisols, os estudos referentes à fertilidade do P para solos de Costa Rica não são tão numerosos quanto para Andisols, provavelmente pela presença de materiais vulcânicos, as pesquisas no país têm sido orientadas em sua maioria a esse outro tipo de solos.

Como pode ser observado, essa complexidade de solos e a presença de materiais amorfos nos solos vulcânicos dificulta os trabalhos de determinação da fertilidade do solo mediante as diferentes metodologias de avaliação, principalmente para o caso do P, e conseqüentemente na recomendação de adubação.

2.5 Metodologias de análise para determinação do P disponível para as plantas

Sendo o P um elemento com uma alta complexidade tanto ao nível de solo quanto em absorção pela planta, como mencionado, existe uma grande diversidade de métodos ou extratores que são utilizados para a avaliação do seu estado nutricional para as plantas. A adoção de um desses métodos de análise deve basear-se na melhor correlação da quantidade do nutriente extraído pela solução ou método, com o que realmente absorve a planta (ALVARADO et al., 2009). Em seguida são apresentadas algumas das características de alguns desses métodos de extração.

Métodos de Olsen, Mehlich e Bray:

O extrator Olsen é considerado como um extrator alcalino desenvolvido para solos calcários com predominância de fosfatos de Ca (ABDÚ, 2006; MALLARINO, 1995), consistindo de uma solução $0,25 \text{ mol/L}$ de NaHCO_3 tamponada a pH de 8,5 (OLSEN et al., 1954). O princípio do método é o funcionamento do HCO_3^- como um bom trocador de fosfato enquanto que o Na reduz a atividade do Ca que fica em solução (CABALCETA, 1993).

Devido ao sucesso do extrator Olsen como método de determinação da disponibilidade de P do solo, surgiram diferentes modificações como variações no tempo de agitação, a relação solo/solução extratora, e a utilização de volume de solo em vez de peso para ser adaptado aos laboratórios de rotina (SINCLAIR et al., 1997). Algumas das modificações como, por exemplo, acrescentar um processo de centrifugação ao método original podem provocar uma maior variação dos resultados (POILE et al., 1990). Porém é importante detalhar em estudos de pesquisa as modificações de cada método que estão sendo empregadas e a validação dessas modificações.

Outras modificações são as combinações com outros extratores para determinar mais nutrientes na mesma análise, como ocorre na Costa Rica com a modificação para determinar micronutrientes na mesma extração (DÍAZ-ROMEY; HUNTER 1978). A modificação consiste na adição de EDTA e Superfloc 127 (poliacrilamida) como floculante.

A metodologia Olsen modificada de Díaz-Romey e Hunter tem sido validada na Costa Rica mediante estudos de calibração e determinação dos níveis críticos em casa de vegetação e em campo para arroz e milho (CORDERO; MINER 1975) e para sorgo em casa de vegetação (CABALCETA, 1993). Ressalta-se que nas condições da Costa Rica o extrator Olsen modificado sempre tem dado correlações relativamente boas com o rendimento da cultura, superando extratores como Mehlich I, Mehlich II, Mehlich III e Bray I em ensaios de calibração (CABALCETA, 1993) e também ao nível de campo em ensaios de resposta à adubação (ALVARADO et al., 2009).

Negrín et al. (1995) menciona que em solos com propriedades vulcânicas, os extratores do tipo alcalino como o Olsen tendem a superestimar os teores de P em solução, razão pela qual o extrator pode não correlacionar bem com o rendimento da cultura. Essa superestimativa obtida por outros autores concorda com os resultados de Cabalceta (1993), quem assinala que os níveis críticos de P nos Andisols da Costa Rica são mais altos comparados com outras ordens de solos testados no seu experimento. A Costa Rica possui grande quantidade de solos derivados de cinzas vulcânicas, nos quais é utilizado o extrator Olsen modificado como método de rotina.

O Mehlich I é outro extrator muito utilizado que tem mostrado alta reprodutibilidade, baixos custos e baixa demanda de tempo, funciona muito bem para solos ácidos com baixo teor de matéria orgânica (MYLAVARAPU et al., 2002).

Apresenta a desvantagem de quando utilizado em solos adubados com fosfatos naturais superestimar a disponibilidade de P para as plantas, por ser mistura de dois ácidos fortes (sulfúrico e clorídrico), solubilizando os fosfatos de cálcio que estão na forma indisponível para as plantas (NOVAIS et al., 2007).

O extrator Mehlich III, o qual é diferente do extrator Mehlich I, também funciona bem para estimar a disponibilidade de P para as plantas, principalmente em condições de solo ácido a neutro, não apresentando boa correlação com o rendimento das culturas em solos alcalinos, por exemplo, nos Estados Unidos seu uso está aprovado apenas para as condições com bom desempenho anteriormente mencionadas (WATSON; MULLEN, 2007). O Mehlich III apresenta a vantagem sobre Mehlich I, por ser multielementar (P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn e Mn) e apresentando uma melhor correlação dos teores dos mesmos no solo com o absorvido pelas culturas (MYLAVARAPU et al., 2002).

Método de resina de troca iônica:

Segundo Qian e Schoenau (2001), o primeiro relato sobre o desenvolvimento ou fabricação de uma resina de intercâmbio iônico data de 1930, enquanto que sua utilização na área agrícola para estimar a biodisponibilidade de nutrientes ocorreram em 1951 e 1955, quando Amer e colaboradores, procurando simular a ação das raízes, desenvolveram um método de validação do teor de P no solo, colocando uma resina com solo em solução (AMER et al., 1955).

Saunders (1964 apud QIANG; SCHOENAU, 2001), determinou que as formas de resina em saquinho e em membranas possuíam utilidade prática, mas a técnica de membranas era mais fácil de manipular. Posteriormente o método de extração de P mediante resina sofreu algumas modificações no procedimento, para o qual Sibbesen (1977) colocou a resina dentro de um saquinho de nylon, na qual era incorporada ao solo.

O potencial do método de resina de troca iônica, principalmente as de troca aniônica na determinação de P para ser utilizada como método de rotina é mencionado por diversos autores (BORTOLON et al., 2009; RAIJ et al., 1986; SAGGAR et al., 1999; SCHLINDWEIN; GIANELLO, 2009; SILVA; RAIJ, 1999), onde é ressaltada a importância que tem o método devido a sua extração passiva, a qual parece simular o comportamento das plantas e dos organismos na absorção (CHEESMAN et al., 2010; QIAN; SCHOENAU 2005).

Silva e Raij (1999) mencionam algumas das vantagens que apresenta o método de resina de troca iônica na determinação de P: são altos os coeficientes de correlação com rendimento das culturas, inclusive superiores a outros métodos; pode ser utilizado em solos com diversas faixas de pH, retratando também o efeito da calagem quando esta prática aumenta a disponibilidade de P para as plantas; não superestima nos teores de P nos solos tratados com fosfatos naturais, ao contrario dos extratores tipo ácido que dissolvem formas de P não disponíveis para as plantas.

Braida et al. (1996) mencionam como vantagem para o método da resina de não prescindir da classificação dos solos para sua utilização e interpretação, por tanto seu uso seria mais apropriado para condições diversas, por exemplo solos com diferente teor de argila no solo, o qual pode alterar os resultados das análises feitas com outros extratores como Mehlich III. Entretanto Bortolon et al. (2011) relatam que em estudos anteriores vários autores assinalam que fatores como pH, conteúdo de argila e mineralogia podem afetar os resultados das análises com a resina, não especificando, porém, em que medida é afetado o resultado em comparação aos outros extratores.

Saggar et al. (1999), em um ensaio de doses de P em solos de pastagens em Nova Zelândia, encontraram uma maior concordância entre a produtividade e conteúdo de P com resina de troca aniônica, comparando as avaliações feitas nos mesmos solos com o extrator Olsen. Os autores deduzem que esta maior concordância entre rendimento e quantidade determinada por parte da resina pode ser pela aplicação de fontes grossas de P (SPT), resultando em menor extração pelo Olsen, e seja possível que o NaHCO_3 não tenha dissolvido completamente os resíduos do fertilizante. Esses autores (SAGGAR et al., 1999) compararam os resultados da resina de troca iônica com várias modificações no extrator Olsen, tais como tempo de agitação, amostra determinada por peso e por volume, tendo sempre obtido a melhor explicação dos resultados pelos valores determinados pelo método da resina. Cabe ressaltar que a metodologia de Olsen aqui comparada não foi a descrita por Díaz-Romeu e Hunter (1978) (Olsen modificada).

No Brasil Raij e Texeira (1984), depois de avaliar 4 extratores de P (IAC, Bray I modificado, Olsen e Resina troca aniônica), concluíram a favor do método da resina, tem sido este o mais recomendável para as condições dos solos testados. Resultados similares tem sido obtidos por Holanda et al. (1995), onde comparando

diferentes extratores de P, encontraram alta correlação com o rendimento da cultura para os métodos Bray I e resina ($R^2 = 0,92$ e $0,91$, respectivamente). Além disso, esses autores também encontraram uma alta correlação entre os valores determinados por Bray I e resina, o qual, segundo Schlindwein y Gianello (2008), não acontece com os dados do Mehlich I comparado com o método da resina. Sobral (2009), comparando o desempenho dos extratores Mehlich 1, Mehlich 3 e resina, encontrou maiores coeficientes de correlação para o extrator resina, seguido pelo Mehlich 1 e por último o Mehlich 3, quando foram correlacionadas a absorção de P pelas plantas de milho e os teores de P no solo obtidos com os diferentes extratores.

Schlindwein e Gianello (2009) avaliaram o método de resina para a determinação de P em diferentes condições de umidade do solo, encontrando que a resina enterrada em solo saturado correlaciona melhor que quanto à capacidade de campo; nas condições de resina enterrada obtiveram também melhores resultados comparado com outros extratores (Mehlich I e Mehlich III). Além disso, os autores mencionam que o melhor tempo de avaliação da resina enterrada é de 10 dias, tempo em que obtiveram o melhor R^2 .

Mas, nem todos os estudos conferem a superioridade ao método de resina sobre os outros extratores. Corrêa e Haag (1993), encontraram uma correlação muito alta ao avaliar os extratores Mehlich I e resina, estudo em que não encontraram uma superioridade marcada de uma ou outra metodologia. Isso também aconteceu com Santos e Kliemann (2005), que aplicando doses de fosfatos em diferentes solos, encontraram altos valores de correlação, não diferenciando superioridade entre algum dos extratores utilizados.

Quanto ao tempo de extração no laboratório, Sousa e Coutinho (2009) considerando como desvantagem o tempo de extração de 16 horas no processo de agitação pelo método da resina, testaram diferentes tempos de agitação e concluíram que com 2 horas é suficiente para obter resultados satisfatórios, embora os coeficientes de variação aumentaram de 5% (16 horas) para 14% (2 horas).

Apesar das vantagens já mencionadas por outros autores, Sherrod et al. (2003) demonstraram que o método de resina também pode ter o problema de grande variabilidade dos resultados, dependendo de fatores como os íons com os que são carregadas as resinas, os quais funcionam como trocadores com o elemento a ser analisado, concluindo que a escolha do íon pode ocasionar uma

ampla variabilidade dos resultados. Esta é uma das razões pela qual é necessária uma padronização do método e também reforça o requerimento da calibração do método tanto para as diferentes condições de solos, quanto para os procedimentos de laboratório empregados.

Em alguns ensaios de calibração de metodologias de determinação de P, têm sido encontrados melhores resultados para outros extratores em relação à resina de troca iônica, como relatado por Brasil e Muraoka (1997) em solos da Amazônia, onde foi encontrada uma melhor correlação com o rendimento da cultura para o Mehlich III em relação ao Bray I e resina de troca aniônica; outros autores também têm encontrado resultados menos favoráveis da resina quando comparada com outros extratores (PAVAN; CHAVES (1996 apud SANTOS; KLIEMANN 2005)).

O uso de resinas não se limita à determinação de P nos solos, tendo sido também utilizada para avaliar N e S, obtendo correlações bastante satisfatórias com os rendimentos das culturas (QIANG; SCHOENAU, 2005, 2007), e mineralização de N (BOWATTE, 2008), já que a liberação do N e S pela matéria orgânica tem um papel fundamental na disponibilidade para as plantas. No caso do N, por ser um nutriente encontrado no solo tanto como cátion quanto como ânion, é preciso utilizar na sua determinação uma resina de troca aniônica e catiônica, além de combinar com um processo aeróbico e anaeróbico (QIANG; SCHOENAU, 2005).

Embora até o ano 2001 o método de análise em resina de troca iônica tivesse sido utilizado em mais de 400 publicações, dentre as quais destacando a análise de nutrientes, na Costa Rica ainda não existe calibração do método para seu uso em rotina.

H3A-1 e H3A-2:

Outras metodologias desenvolvidas recentemente, como no caso os extratores tipo H3A, possuem critérios teóricos que não são contemplados em outras metodologias de extração, por exemplo os extratores Olsen modificado e Mehlich I, II e III, que realizam a extração em valores de pH muito diferente ao pH do solo, fato que poderia derivar em uma superestimativa ou subestimativa do P disponível para as plantas. Os extratores H3A contém compostos que normalmente são utilizados pelas plantas para superar deficiências de P, tais como ácidos orgânicos. Os extratores H3A-1 e H3A-2 realizam a extração em valores de pH similares ao pH do solo, sendo que os autores da metodologia relatam que o pH do extrato final no caso

do H3A-1 não varia em mais de 1 unidade de pH na grande maioria dos solos testados quando comparado com o pH do solo. A variação do pH do extrato pode resultar em um mesmo solo diferentes teores de P, razão pela qual os autores mencionam que um extrator “ideal” deveria extrair o P em valores de pH similares aos que a planta se desenvolve, ou seja similares ao pH do solo (HANEY et al., 2006). Assim Haney e colaboradores desenvolveram o extrator H3A-1, o qual é uma mistura de citrato de lítio, ácido cítrico, ácido málico, ácido oxálico, EDTA e DTPA com um pH de 5,0.

Posteriormente os mesmos autores realizaram modificações ao extrator original, por causa do desenvolvimento de coloração amarela em alguns dos solos, tirando o EDTA e o DTPA e modificando as concentrações dos diferentes componentes com o qual diminuíram o pH do extrator, nomeando o método como H3A-2 (HANEY et al., 2010).

Estas novas metodologias devem ainda ser avaliadas com a resposta das plantas, já que os autores somente compararam a extração com os apresentados por outras metodologias, não tendo sido ainda testadas contra as variáveis resposta das plantas.

Nível crítico:

Segundo Cabalceta (1993), o nível crítico (NC) é definido como a concentração de um nutriente acima da qual são obtidas altas produções e a probabilidade de incrementos notáveis na produção devido a aplicações do nutriente é baixa, enquanto que a concentrações abaixo dele geralmente apresentam rendimentos pobres e grandes probabilidades de resposta a adições do nutriente. Cantarutti et al. (2007) e Fernandes e Coutinho (1997) mencionam que essa faixa na qual se encontra o NC situa-se geralmente entre o 80 e 90% do rendimento relativo. Para solos da Costa Rica esses níveis críticos têm sido determinados mediante a metodologia gráfica de Cate e Nelson (CABALCETA, 1993). Em outras partes do mundo, além do nível crítico de interesse agrícola, tem sido definido o nível crítico ambiental, o qual representa o valor a partir do qual poderiam ser contaminadas as fontes de água, um exemplo sendo a tabela de níveis críticos apresentada em Sharpley et al. (2003), além de outras faixas de suficiência do elemento no solo (por ex., muito baixa baixa, média e alta), as quais são estabelecidas subjetivamente segundo as produções relativas (CANTARUTTI et al., 2007). A faixa “muito alta”

representa aos dados estabelecidos para diferentes extratores com importância ambiental, já que normalmente corresponde ao consumo de luxo na planta.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Amostragem e preparo das amostras

Foram coletadas 21 amostras de solos de diferentes partes da Costa Rica de diferentes origens, intemperização e teor de P, cujas coordenadas de cada ponto de coleta foram marcadas com a ajuda de um GPS (tabela 1). Em todos os pontos foram coletados os 10 cm superiores, removendo os restos vegetais que estavam depositados sobre o solo. Os solos, como são mostrados na tabela 1, corresponderam a três ordens distintas de acordo com a classificação.

Tabela 1 - Identificação e localização dos solos da Costa Rica utilizados no experimento de calibração de diferentes extratores de P

Localidade	Classificação*	ID	Coordenadas	
			Latitude (N)	Longitude (W)
La Esmeralda, Lote Duro	Andisol	1	10,07441	-84,14169
Entre Guácimo y Guápiles	Andisol	2	10,121815	-83,431002
Aguas Claras San Vito	Andisol	3	8,848033	-82,965826
Santa Rosa de Sabalito	Andisol	4	8,784717	-82,904481
Rancho Redondo (Irazú)	Andisol	5	9,574112	-83,57022
Beneguaria, Naranjo	Andisol	6	10,05057	-84,22516
Naranjo ABC	Andisol	7	SD**	SD**
Río Frío	Inceptisol	8	10,130532	-83,541561
Piedras Blancas de Osa	Inceptisol	9	8,783029	-83,241199
Guácimo	Inceptisol	10	10,142368	-83,394574
Bustamante	Inceptisol	11	9,45455	-84,04322
Parrita, Palma Tica.	Inceptisol	12	9,541523	-84,311939
Savegre Palma Tica	Inceptisol	13	9,371212	-84,035576
Palmares	Inceptisol	14	SD**	SD**
Sabanilla Coto Brus	Ultisol	15	8,876774	-83,065334
Las Vueltas, Buenos Aires	Ultisol	16	8,960727	-83,162224
Muelle de San Carlos	Ultisol	17	SD**	SD**
Sarapiquí	Ultisol	18	10,255915	-84,052802
Pavones, Pérez Zeledón	Ultisol	19	9,20149	-83,41308
Pérez Zeledón, Cajón Quemado	Ultisol	20	9,16294	-83,34119
La Cuesta, León Cortés	Ultisol	21	9,46166	-84,02273

*Classificação do solo para ordens de acordo com o sistema de classificação proposta por USDA – Soil taxonomy.

** SD: Coleta sem dados de coordenadas.

As amostras de solo foram secas ao ar, e homogeneizadas, peneiradas em malha de 2 mm (TFSA), caracterizadas e analisadas quanto ao teor de P com os diferentes extratores de P.

3.2 Caracterização química e análises dos solos

3.2.1 Análises de caracterização da fertilidade do solo (exceto P)

As amostras de solos foram submetidas às determinações de pH, acidez trocável e potencial, Ca e Mg trocáveis e C. Os métodos empregados para a determinação foram:

- A determinação do pH em água, na proporção de 1:2,5, foi realizada usando-se 10 gramas de terra (TFSA), segundo método descrito em Henríquez et al. (1995).
- A acidez potencial foi determinada segundo Raij et al. (2001), utilizando a solução de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ pH 7,0, e a acidez trocável, segundo Diaz-Romeu e Hunter (1978), empregando-se uma solução de KCl 1 mol L⁻¹.
- Os teores de Ca e Mg trocáveis foram determinados pelo método da resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001) e com solução de KCl 1 mol L⁻¹ (Díaz-Romeu; Hunter, 1978), sendo estes métodos utilizados no Estado de São Paulo, Brazil, e na Costa Rica, respectivamente.
- O teor de C no solo foi determinado pelo método de via úmida (Walkley e Black), modificado por Quaggio (RAIJ et al., 2001).

3.2.2 Análises de P no solo

- P Total:

O P total foi determinado pelo método de digestão ácida em banho de areia com uma mistura de 5 mL de HF (ácido fluorídrico), 5 mL de HNO₃ (ácido nítrico) e 2 mL de HClO₃ (ácido perclórico), com 0,5 g da TFSA em cadinho de teflon. A digestão iniciou-se a uma temperatura de 100°C, aumentando gradualmente até valores de aproximadamente 220°C (até quase secagem). Após a digestão, o resíduo foi diluído em balão de 50 mL com HCl 0,1 mol L⁻¹ e o P determinado pelo método colorimétrico de Molibdato/Vanadato e leitura a 420 nm. Esta metodologia corresponde ao utilizado no laboratório de Fertilidade do Solo do CENA/USP (MURAOKA, 2011¹) (comunicação pessoal).

¹ Muraoka, T. Laboratório de Fertilidade do Solo, CENA-USP. 2011.

- Bray 1 (BRAY; KURTZ, 1945):

Pesou-se 3,0 g de TFSA em erlenmeyer de 125 mL, adicionando 30 mL do extrator (NH_4F 0,03M + HCl 0,025 M) e agitado por 1 minuto. Imediatamente após a agitação as amostras foram filtradas utilizando-se papel filtro Whatman N°42. Para a determinação do P foram tomados 5 mL do extrato e o P foi determinado pelo método de molibdato (azul), com redução por meio do ácido ascórbico, segundo Murphy e Riley (1962), fazendo as leituras em um espectrofotômetro a 660 nm.

- Mehlich 1:

Colocou-se 3 g de TFSA em erlenmeyer de 125 mL, adicionando 30 mL do extrator (HCl 0,05 mol L^{-1} + H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1} (NELSON et al., 1953)) e agitou-se por 5 minutos. Para a determinação de P do extrato, tomaram-se 5 mL do filtrado (Whatman N°42) e a quantidade de P foi determinada pelo método sulfo-bismuto-molibdico, descrito por Catani e Nakamura (1971), e as leituras foram realizadas no espectrofotômetro a 660 nm.

- Mehlich 3:

5 dm³ de TFSA e foram agitadas por 10 minutos em erlenmeyer de 125 ml, com 50 mL da solução extratora (0.015 mol L^{-1} NH_4F , 0.2 mol L^{-1} ácido acético (CH_3COOH), 0.25 mol L^{-1} NH_4NO_3 , 0.013 mol L^{-1} HNO_3 , 0.001 mol L^{-1} EDTA, pH = 2,5), proposta em Mehlich (1984), e filtrando com papel de filtro Whatman 42. A determinação do P realizou-se por colorimetria no espectrofotômetro a 660 nm, utilizando o método azul de Murphy e Riley (1962).

- Olsen modificado (DIAZ-ROMEY; HUNTER, 1978)

Extrator: 0,5 mol L^{-1} NaHCO_3 , 0,01 mol L^{-1} EDTA com 0,05 g de Superfloc 127 por litro de solução extratora

Pesaram-se 42 g de NaHCO_3 + 3,72 g de EDTA disódico + 0,05 g de Superfloc 127. Essa solução deve deixar-se dissolvendo no mínimo por 3 horas. No momento de fazer a extração ajustar o pH a 8,5 com NaOH e completar a 1 L. Guardar a solução em frasco de polietileno.

Preparo dos reativos de determinação:

Solução concentrada de SnCl_2

Solução A: Dissolver 3 g de SnCl_2 em 10 mL de HCl concentrado. Esquentar levemente se for necessário. Diluir com água destilada a um volume de 100 mL e manter em frasco âmbar, fechado e na geladeira.

Solução concentrada de Molibdato de Amônio

Solução B: Dissolver 25 g de Molibdato de Amônio em aproximadamente 200 mL de água destilada. Adicionar 275 mL de ácido sulfúrico concentrado a aproximadamente 500 mL de água destilada. Quando as soluções esfriar, mistará-las e completar o volume a 1 L. Colocar na geladeira.

Solução C (solução diluída do SnCl_2): Preparar no dia que vai ser usada, diluindo 5 mL da solução A em um volume de 1 litro com uma solução contendo 1 g de gelatina livre de P por litro.

Solução D (solução diluída de molibdato de amônio): No dia que usar, diluir 100 mL da solução B a um volume de 1 litro.

Extração:

Cachimbar 2,5 dm³ de TFSA e adicionar 25 mL do extrator Olsen modificado, agitar por 10 minutos a uma velocidade aproximada de 400 rpm.

Filtrar usando papel S&S No.860, Whatman No.42 ou de qualidade similar.

Determinação de P:

Preparar curvas padrões para os nutrientes a determinar na solução extratora Olsen modificada; as curvas padrões para P e para K devem ser feitas separadas, porém para o Cu, Fe, Mn e Zn, podem ser preparados na mesma solução.

Em uma alíquota de 2 mL do extrato filtrado, adicionar 8 mL da solução C e 10 mL da solução D. Deixar e repouso por 10 minutos ou mais para o desenvolvimento da cor, depois fazer a leitura a 660 nm (a cor é estável pelo menos por 3 horas).

Determinação de K: Tomar uma alíquota de 2 mL do extrato filtrado e adicionar 18 mL de água destilada, fazer a leitura no fotômetro de chama.

Determinação de Cu, Fe, Mn e Zn: Fazer as leituras diretamente no espectrofotômetro de absorção atômica.

- Resina troca iônica (RAIJ, 1986):

Foi utilizado o método de extração de nutrientes com resina de troca iônica carregada com bicarbonato de sódio e recuperação do extrato com cloreto de

amônio e HCl. Usou-se relação solo:resina = 1:1, pesando-se 2,5 gramas de TFSA e posteriormente seguindo a metodologia descrita em Raji et al. (2001).

- H3A-1 modificado

O extrator H3A-1 consiste originalmente de HANEY et al., 2006:

- 5 g L⁻¹ de citrato de lítio
- 0,5 g L⁻¹ de ácido cítrico
- 0,5 g L⁻¹ de ácido málico
- 0,5 g L⁻¹ de ácido oxálico
- 0,25 g L⁻¹ de EDTA
- 0,25 g L⁻¹ de DTPA

Devido à dificuldade de se obter o reagente citrato de lítio, este foi substituído pelo citrato de sódio, usando quantidade de citrato de sódio com base na molaridade do ânion citrato utilizada no extrator original, com o fim de manter o mesmo pH do extrator (pH=5,0). Foi portanto, utilizado 6,14 g L⁻¹ de citrato de sódio em vez das 5 g de citrato de lítio por litro de solução extratora. Para a extração pesou-se 4 gramas de TFSA em tubo plástico de 50 mL (tipo “Falcon”), agitadas com 40 mL de solução extratora em posição horizontal durante 30 minutos e posteriormente centrifugadas e filtradas com papel Whatman No 42. Para as determinações de P foi utilizado o método colorimétrico azul de Murphy e Riley (1962) e a leitura realizada em espectrofotômetro a 660 nm.

- H3A-2 modificado

O extrator H3A-2 (HANEY et al., 2010) original consiste de:

- 2 g L⁻¹ de citrato de lítio
- 0,6 g L⁻¹ de ácido cítrico
- 0,4 g L⁻¹ de ácido málico
- 0,4 g L⁻¹ de ácido oxálico

Esta metodologia foi também modificada substituindo o citrato de lítio por 2,458 g de citrato de sódio, modificando-se também o tempo de agitação de 5 para 15 minutos, uma vez que com 5 minutos extraia-se quantidade muito pequena de P, dificultando a comparação entre os solos.

A metodologia consistiu em pesar 4 g de TFSA em tubo plástico de 50 mL, com 40 mL de solução extratora, agitação horizontal (tubo deitado) durante 15 minutos e posterior centrifugação (3000 rpm durante 5 minutos) e filtração com papel de filtro Whatman No. 42. Determinou-se o P pelo método azul de Murphy e Riley (1962) com leituras no espectrofotômetro a 660 nm.

3.3 Experimento para a determinação da produção relativa, concentração e acúmulo de P em plantas de arroz

3.3.1 Estabelecimento dos tratamentos em vasos

Em vasos contendo 500 mL de TFSA, foram colocadas 25 sementes de arroz, var. Palmar 18, realizando desbastes uma semana após a germinação, deixando 20 plantas por vaso.

A irrigação do experimento foi feita por capilaridade, visando homogeneidade no experimento, colocando um filtro de charuto de 15 cm de comprimento com entrada pela parte inferior do vaso, e introduzido 2 cm no vaso para estabelecer contato com o solo.

3.3.2 Tratamentos

Para a determinação da produção relativa estabeleceu-se um tratamento padrão ou “ótimo”, o qual serviu de comparador como o “máximo” potencial de produção que tem **cada solo**. Foram adicionados os seguintes nutrientes segundo as necessidades das plantas dentro de cada solo:

- N: μg de N mL^{-1} de solo, além de adicionar, na água de irrigação, 100 mg N L^{-1} H_2O , utilizando como fonte o NH_4NO_3 (CABALCETA, 1993; DIAZ-ROMEY; HUNTER, 1978)
- P: com base nos valores médios de sorção de P (CABALCETA, 1993), foram aplicados 10 mL vaso $^{-1}$ de uma solução com 10.000 mg de P L^{-1} , sendo o valor de sorção 80% para Andisols e Ultisols, e 4 mL vaso $^{-1}$ desta mesma solução nos Inceptisols, cujo valor de sorção utilizado foi de 50%.
- K: solos que apresentaram teores de K inferiores a 2 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ (segundo o extrator Olsen modificado) receberam aplicação de 5 mL da solução contendo 7.800 mg K L^{-1} (KCl, p.a.).

- Zn: foram adicionados 5 mL vaso⁻¹ de uma solução contendo 15 mmol Zn L⁻¹ nas amostras que apresentaram baixos teores de Zn (10 mg dm⁻³) segundo a extração em Olsen modificado.
- Ca e Mg: foi realizada correção com MgOH e CaO (p.a.), observando a relação Ca/Mg de 1,9 (FAGERIA, 2001), utilizando o cálculo descrito na Equação 1.

$$\text{Necessidade de calcário (t ha}^{-1}\text{)} = \frac{1,5 \cdot (\% \text{ Sat. Al inicial} - \% \text{ Sat. Al desejada}) \cdot \text{CTC}}{\text{PRNT do calcário}} \quad \text{eq. (1)}$$

Além do tratamento ótimo (T1), foram utilizados, também, o tratamento sem P, com aplicação dos nutrientes citados e sem a aplicação do P (T2) e o tratamento testemunha, sem aplicação de reagentes como fertilizantes e/ou corretivos (T3).

3.3.3 Produção relativa, concentração e acúmulo de P nas plantas de arroz cultivadas nos diferentes solos

A colheita do material foi realizada 40 dias após a semeadura, cortando a parte aérea das plantas na base das mesmas. O material foi seco em estufa a 65°C, pesado para o cálculo da produção relativa (%PR) para cada um dos solos.

Para a determinação da produção relativa (%PR) foi utilizada a seguinte fórmula:

$$\%PR = \frac{\text{Peso de matéria seca do tratamento sem adição de P (T2)}}{\text{Peso de matéria seca do tratamento com adição de P (T1)}} \cdot 100 \quad \text{eq. (2)}$$

Aos resultados do experimento foram aplicadas análises variância e também foram aplicadas análises de correlação e regressão entre as diferentes variáveis determinadas na planta (% PR, concentração de P, acúmulo de P) e no solo (P total no solo, P Bray 1, P Mehlich 1, P Mehlich 3, P Olsen modificado, P Resina de troca iônica, P H3A-1 modificado e P H3A-2 modificado).

Para a estimação dos níveis críticos de P nos 3 diferentes tipos de solo, foram realizadas as deduções matemáticas no modelo de regressão, visando uma

produção relativa de 90% e também mediante a comparação da resposta ou ausência de resposta à adição de P fertilizante no experimento.

3.4 Análise estatística

Os dados foram, inicialmente, submetidos ao teste W de normalidade. Após a análise descritiva, foram realizados diferentes testes de acordo com a natureza dos dados e do objetivo do trabalho.

Para comparação dos extratores de P com as características do solo (pH, Ca, Mg, K e Al) foi utilizada o teste de correlação de Spearman ($p > 0,10$), uma vez que a relação entre estas variáveis poderiam não ser, necessariamente, linear, e algumas características não atenderam os pressupostos da distribuição normal.

Os extratores para Ca, Mg e K (KCl e resina) foram comparados por meio de regressão linear simples, para verificar relação direta entre os valores numéricos encontrados para cada elemento avaliado.

A produção relativa (PR) foi comparada com os diferentes extratores de P por meio da correlação de Spearman e análise de regressão, sendo utilizados modelos não-lineares que possibilitaram estimar o nível crítico de P no solo.

Os teores de P na planta, total de P acumulado e teor de P no solo foram submetidos ao teste de correlação de Pearson e análise de regressão linear simples, por serem variáveis que se esperava alta linearidade.

Adicionalmente, foram realizadas análises de correlação de Pearson para os extratores, comparando-os. Esta comparação foi realizada com todos os solos trabalhos e dentro de cada ordem de solo.

A produção de massa seca da parte aérea em cada solo foi submetida à análise de variância, utilizando o delineamento de blocos casualizados com 3 tratamentos e 3 repetições (blocos). O modelo matemático para a análise de variância foi definido como:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + B_j + \varepsilon_{ij}, \text{ onde}$$

μ = média geral; α_i = efeito do i-ésimo tratamento; B_j = efeito do j-ésimo bloco; ε_{ij} = efeito do erro aleatório no i-ésimo tratamento e j-ésima repetição (bloco).

Para comparação de médias, adotou-se o teste t Student (LSD).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos solos utilizados no estudo

Na tabela 2 são apresentadas as características químicas dos solos utilizados no experimento. Cabe destacar que, por ser um estudo de solos de Costa Rica e realizado em grande parte no Brasil, foram avaliadas as características químicas mediante os enfoques da Costa Rica (a) e do Estado de São Paulo, Brasil (b).

Tabela 2 - Características químicas dos solos utilizados no estudo

a) Ca, Mg, K e Al determinados pela metodologia utilizada na Costa Rica (continua)

Localidade	ID	pH _{água}	C	Al troável*	Ca*	Mg*	K**	CTC	m***
Unidade→	--	--	g kg ⁻¹	mmol _c dm ⁻³ solo	mmol _c dm ⁻³ solo	mmol _c dm ⁻³ solo	mmol _c dm ⁻³ solo	mmol _c dm ⁻³ solo	%
La Esmeralda, Lote Duro	1	4,3	22,2	26,8	14,8	6,1	6,8	54,5	49,2
Guácimo-Guápiles	2	4,9	42,7	10,8	18,9	4,3	1,6	35,6	30,3
Aguas Claras San Vito	3	5,5	65,6	5,0	34,5	9,1	2,7	51,3	9,7
Santa Rosa de Sabalito	4	5,6	51,7	5,2	43,1	10,7	2,1	61,1	8,5
Rancho Redondo (Irazú)	5	5,8	17,2	2,5	21,5	7,3	2,2	33,5	7,5
Beneguaria, Naranjo	6	4,7	33,6	15,7	20,6	4,7	3,5	44,5	35,3
Naranjo ABC	7	5,5	25,4	2,8	53,1	14,9	2,8	73,6	3,8
Río Frío	8	5,8	10,7	2,2	21,4	4,5	0,7	28,8	7,6
Piedras Blancas, Osa	9	5,6	18,9	3,2	305,6	28,5	2,1	339,4	0,9
Guácimo	10	5,3	18,9	6,3	51,8	18,8	3,4	80,3	7,8
Bustamante	11	6,1	24,6	2,1	97,5	28,9	7,6	136,1	1,5
Parrita, Palma Tica	12	6,4	21,3	1,7	199,5	54,9	5,6	261,7	0,6
Savegre Palma Tica	13	5,7	7,4	6,3	172,0	38,2	1,0	217,5	2,9
Palmares	14	3,5	14,8	43,0	35,6	5,0	4,7	88,3	48,7
Sabanilla Coto Brus	15	5,2	1,6	77,2	5,2	4,7	0,1	87,2	88,5
Las Vueltas, Buenos Aires	16	5,1	2,5	46,7	9,7	2,8	0,5	59,7	78,2
Muelle de San Carlos	17	4,9	6,6	25,4	5,6	3,8	0,1	34,9	72,8
Sarapiquí	18	4,6	9,8	15,9	2,4	1,4	1,1	20,8	76,4
Pavones, Pérez Zeledón	19	5,0	19,7	11,2	32,2	3,9	1,8	49,1	22,8
Pérez Zeledón, Cajón	20	4,9	19,7	8,1	25,6	4,7	1,5	39,9	20,3
La Cuesta, León Cortés	21	4,8	32,0	7,6	49,8	12,2	4,6	74,2	10,2

*Determinado com solução extratora KCl 1 mol L⁻¹

**Determinado pelo método de Olsen modificado

***Saturação por Al, calculado com Ca, Mg e Al determinados em solução KCl 1 mol L⁻¹

Tabela 2 - b) Caracterização química dos solos utilizados no experimento pela metodologia utilizada no Estado de São Paulo (conclusão)

Localidade	Ca*	Mg*	K*	Acidez Potencial (H+Al)**	CTC potencial	(V%)
	mmol _c kg ⁻¹ solo	mmol _c kg ⁻¹ solo	mmol _c kg ⁻¹ solo	mmol _c kg ⁻¹ solo	mmol _c kg ⁻¹ solo	
La Esmeralda, Lote Duro	12,6	5,8	11,6	80,0	110,0	27,3
Guácimo-Guápiles	21,4	6,5	2,9	91,0	121,8	25,3
Aguas Claras San Vito	78,6	23,9	4,1	113,0	219,5	48,5
Santa Rosa de Sabalito	83,0	26,7	3,5	113,0	226,2	50,0
Rancho Redondo (Irazú)	33,8	14,5	2,3	32,0	82,6	61,2
Beneguaría, Naranjo	41,0	9,9	5,7	94,0	150,6	37,6
Naranjo ABC	98,2	33,4	6,4	45,0	183,1	75,4
Río Frío	24,4	6,7	1,4	36,0	68,4	47,4
Piedras Blancas, Osa	370,6	32,7	2,4	42,0	447,6	90,6
Guácimo	51,2	24,5	5,4	72,0	153,1	53,0
Bustamante	224,7	62,4	7,3	18,0	312,4	94,2
Parrita, Palma Tica	272,8	84,5	5,2	20,0	382,5	94,8
Savegre Palma Tica	70,5	21,6	15,6	30,0	137,8	78,2
Palmares	31,0	4,9	6,5	105,0	147,4	28,7
Sabanilla Coto Brus	6,6	6,5	1,9	74,0	89,1	17,0
Las Vueltas, Buenos Aires	11,6	4,1	0,9	54,0	70,6	23,5
Muelle de San Carlos	8,5	6,8	0,6	39,0	54,9	29,0
Sarapiquí	5,3	2,1	1,7	64,0	73,0	12,4
Pavones, Pérez Zeledón	36,6	6,5	2,5	55,0	100,5	45,3
Pérez Zeledón, Cajón	51,3	9,1	1,9	53,0	115,2	54,0
La Cuesta, León Cortés	96,8	24,4	4,6	69,0	194,8	64,6

* = Determinados pela resina trocadora de íons (RAIJ et al., 1991).

** = Determinado com solução acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ pH 7,0

V% = Saturação por bases

4.1.1 pH em água

Os solos utilizados no estudo apresentaram em geral um pH baixo ou ligeiramente ácidos, com uma média de pH_{água} = 5,2. O menor valor de pH encontrado foi 3,5 e o maior 6,4 (tabela 2), em ambos os casos correspondendo a Inceptisols, denotando a ampla variação que normalmente pode ser encontrada neste tipo de solos.

Os solos vulcânicos apresentaram pH ácido, característica esperada nestes solos em Costa Rica como mencionado no item de Revisão de Literatura (BLASCO, 1976), obtendo-se valores entre 4,3 e 5,8, com uma média de 5,2. Os Inceptisols apresentaram em geral valores de pH mais elevados em relação aos outros tipos de solo estudados (média de 5,5), sendo que a maioria dos solos dessa ordem ficaram com pH acima da média (5,5), exceto o solo de Guácimo (pH 5,3) e o solo de

Palmares (pH 3,5). Para os solos mais intemperizados (Ultisols) o pH_{água} do solo foi muito menor, tendo todos os solos avaliados ficados com pH menor do que 5,2 e média de 4,9.

Como descrito anteriormente, foram utilizados no experimento solos de uma grande amplitude de pH, fato que era esperado, já que os solos avaliados foram amostrados em diversas partes de Costa Rica e com diversas origens e estados de intemperização.

Segundo a análise de correlação, esta variável (pH) não influenciou significativamente os resultados dos teores de P na maioria dos extratores (tabela 3), nem as quantidades de P acumuladas pelas plantas de arroz (dado não mostrado), resultado que contrasta com o encontrado por Sotomayor-Ramírez et al. (2004). Somente no caso da resina de troca iônica a correlação foi significativa, mas mesmo assim com um coeficiente baixo. A possível falta de relação entre os diferentes extratores e o pH do solo poderia estar relacionado ao princípio de cada extrator, por exemplo os extratores Bray 1, Mehlich 1 e Mehlich 3 por serem soluções ácidas extraem o P em valores de pH diferentes ao pH do solo, e no caso do Olsen modificado em valores de pH altos (8,5), também diferentes do pH do solo. A resina por utilizar uma forma diferente de extração (não modifica as características químicas do solo (ZHENG; ZHANG, 2011)), guardando uma maior relação com essa variável, já que como relatado por vários autores a solubilidade e portanto a disponibilidade do P é influenciada pelos valores de pH (HANEY et al., 2006; HAVLIN et al., 2005; NOVAIS et al., 2007). Com base neste ponto de vista e concordando com Raij et al. (1998), a resina seria o extrator mais indicado para a avaliação do P para as plantas, porque guarda relação com a forma como são absorvidos os nutrientes pelas plantas (absorve íons da solução do solo), não modifica o pH do solo portanto os resultados não seriam afetados por essa variável. Porém, a seleção de um extrator não deve ser dependente exclusivamente das condições do solo e da correlação do extrator com essas variáveis, levando em consideração a planta dentro do sistema, já que esta modifica as condições de seu meio, alterando a disponibilidade de P e outras variáveis do solo como por exemplo o pH. Essa relação que envolve a planta no sistema é abordada em outro item, onde é avaliado o desempenho dos extratores nos diferentes solos.

Tabela 3 - Coeficientes de correlação de Spearman entre o pH em água do solo e os teores de P determinados por diferentes metodologias de extração

Extrator	Coeficiente de correlação
P total	0,16 ^{ns}
P Bray 1	0,15 ^{ns}
P Mehlich 1	0,28 ^{ns}
P Mehlich 3	0,27 ^{ns}
P Olsen modificado	0,16 ^{ns}
P Resina	0,50*
P H3A-1 modificado	0,04 ^{ns}
P H3A-2 modificado	0,16 ^{ns}

^{ns}: não significativo, *: $p < 0,05$

No caso do extrator H3A-1, entre as características que os autores mencionam inclui a não modificação considerável do pH do extrato em relação ao pH do solo (HANEY et al., 2006). Esperava-se daí a concordância entre o pH do solo e os teores de P determinados por esta metodologia, porém não acontecendo isso (tabela 3). Esse comportamento poderia estar relacionado, como mencionado por Haney e colaboradores (2006), com alterações do pH do extrato na maioria dos solos em menos de uma unidade de pH, sendo porém possível que essa unidade de mudança no pH seja suficiente para modificar o comportamento da disponibilidade do P, ocasionando essa falta de concordância entre ambas as variáveis.

Os resultados sugerem que esta variável (pH) não tem muita importância na escolha entre extratores como o Bray1, Mehlich 1, Mehlich 3, Olsen modificado, H3A-1 modificado e H3A-2 modificado.

4.1.2 Bases (Ca, Mg e K) determinadas em KCl 1 mol L⁻¹ e resina trocadora de íons

Em termos gerais e como esperado os Inceptisols apresentaram valores mais altos de bases (Ca, Mg e K), com média de 126, 25,5 e 3,4 mmol_c dm⁻³ determinada com a metodologia KCl-Olsen modificado, respectivamente. A exceção dos solos identificados como Rio Frio e Palmares, os Inceptisols apresentaram valores de Ca acima de 51 mmol_c dm⁻³ e de Mg acima de 18 mmol_c dm⁻³ (tabela 2). Para o caso do K nos Inceptisols, somente os solos de Rio Frio e Savegre apresentaram valores inferiores ao nível crítico de 2 mmol_c dm⁻³ utilizado na Costa Rica para a

interpretação das análises pela a metodologia de Olsen modificado, portanto tendo sido necessária a aplicação do nutriente para o desenvolvimento do experimento.

Os solos vulcânicos apresentaram, em geral, baixos teores de Ca e Mg trocável, com exceção de dois (Santa Rosa de Sabalito e Naranjo ABC) que mostraram valores acima do nível crítico utilizado em Costa Rica para a extração com KCl 1 mol L^{-1} ($40 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para Ca e $10 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para Mg). Para o K somente no solo 2 (Guácimo-Guápiles) foi necessária a adição do nutriente, já que este apresentou teores abaixo do nível crítico.

Nos solos mais intemperizados, como era de se esperar, os teores de bases foram em geral os mais baixos entre os tipos de solo utilizados (tabela 2). A exceção do solo “La Cuesta, León Cortés” em todos os Ultisols foram encontrados com teores de bases abaixo do nível crítico.

O comportamento relatado anteriormente para a metodologia KCl-Olsen modificado apresentou similaridade com os resultados da metodologia de extração com resina troca iônica, com a qual foram obtidos em geral maiores teores de bases nos Inceptisols, seguido pelos Andisols e por ultimo nos Ultisols. Somente a metodologia de extração com resina de troca iônica extraiu proporcionalmente mais Ca e Mg do que com KCl, o mesmo ocorrendo para o K resina em relação ao extraído pelo Olsen modificado.

Os resultados da extração com resina trocadora de íons apresentaram boa correlação com a metodologia utilizada em Costa Rica (KCl-Olsen modificado), com exceção para o solo “Savegre”, que foi identificado com um comportamento diferente aos outros solos “outlier” no modelo de regressão, segundo a análise dos resíduos do modelo de regressão e o teste de Bonferroni realizado no programa estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011) pôde ser detectado como tal.

Como mencionado, ambas as metodologias correlacionaram-se entre si, mesmo sem eliminar o valor atípico (solo Savegre), com altos coeficientes de correlação (Pearson) para o Ca e o Mg (0,81 e 0,76 respectivamente), e apresentando, porém um valor baixo (0,25) para o K. Com a exclusão desse valor atípico, o coeficiente de correlação aumentou para os três nutrientes (coeficiente de correlação linear de Pearson (r): Ca=0,96, Mg=0,95 e K=0,88), refletindo isso em bons ajustes nos modelos de regressão linear (R^2) (Figura 2).

Figura 2 - Modelos de regressão linear das quantidades de Ca, Mg e K determinadas mediante extração com resina trocadora de íons vs extração com KCl-Olsen modificado

É importante a boa correlação encontrada entre as 2 metodologias de extração desses nutrientes, pois no caso de Costa Rica adotar o método de extração com resina trocadora de íons como método de rotina, as quantidades de Ca, Mg e K determinadas por resina poderiam ser interpretadas com base nos resultados obtidos pela metodologia KCl-Olsen modificado, facilitando a comunicação entre as pessoas envolvidas na área de fertilidade do solo, especificamente quanto à interpretação das análises do solo. Raij et al. (1986) também encontraram alta correlação para os teores de Ca e Mg analisados por resina trocadora de íons e por extração em KCl 1 mol L⁻¹, com altos coeficientes de correlação entre ambas as metodologias. Diferente dos solos usados por Raij et al. (1986), neste estudo envolve solos com um menor grau de intemperização, obtendo-se porém um resultado semelhante (alta correlação e menor quantidade extraída pelo método de KCl). A diferença apresentada em relação ao estudo mencionado foi o teor de nutrientes extraídos, já que os modelos de regressão propostos por Raij et al. (1986) possuem maiores pendentes da reta, portanto, se fosse utilizado para os outros tipos de solos de outras localidades, como neste caso com solos de Costa Rica, poderia incorrer em erros de interpretação. Certamente para se obter dados mais precisos dessa relação entre extratores para solos de diferentes regiões e origens, devem ser feitos mais estudos e preferivelmente utilizar um maior numero de amostras.

Não foram encontrados estudos sobre a relação entre as quantidades de K determinadas pelo Olsen modificado e pela resina de troca iônica, como já mencionado anteriormente, obteve-se quando excluído o solo de “Savegre”, uma

alta correlação positiva e significativa. Os resultados do modelo gerado para essas 2 metodologias de extração constam na figura 2.

Por outro lado, à exceção do P total, os resultados dos extratores de P correlacionaram-se positiva e significativamente com os teores de Ca no solo (tabela 4), principalmente com a resina de troca iônica, Mehlich 3 e Mehlich 1. No caso da resina esse resultado poderia estar relacionado ao fato de que a resina extrai íons da solução mediante troca para o caso desta metodologia mediante troca tanto de anions quanto de cátions, os resultados da concordância entre a correlação tanto para o Ca e Mg trocável determinado com solução KCl 1 mol L⁻¹, quanto para o Ca e Mg resina, sugerem que a principal fonte de P determinada por esta metodologia, possivelmente corresponda a fosfatos de cálcio e de Magnésio, os quais poderiam variar em importância de acordo a seus teores em cada solo. Para o caso do Mehlich 3 e Mehlich 1, esse resultado poderia estar relacionado à já conhecida dissolução de fosfatos de Ca pelo ataque dos ácidos (NUERNBERG; LEAL; SUMNER, 1998).

Tabela 4 - Coeficientes de correlação entre as bases trocáveis (Ca, Mg e K) determinadas em solução KCL 1 mol L⁻¹ (KCl), resina troca iônica e K em Olsen modificado, para os teores de P no solo determinados por diferentes metodologias

Metodologia de extração	Coeficiente de correlação de Spearman (ρ)					
	Ca (KCl)	Ca (resina)	Mg (KCl)	Mg (resina)	K (Olsen modificado)	K (resina)
P total	0,27 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,1 ^{ns}
P Bray 1	0,55 ^{**}	0,51 [*]	0,45 [*]	0,39 ^{ns}	0,52 [*]	0,42 ^{ns}
P Mehlich 1	0,67 ^{***}	0,57 ^{**}	0,57 ^{**}	0,45 [*]	0,35 ^{ns}	0,38 ^{ns}
P Mehlich 3	0,74 ^{***}	0,69 ^{***}	0,72 ^{***}	0,53 [*]	0,59 ^{**}	0,63 ^{**}
P Olsen mod.	0,63 ^{**}	0,60 ^{**}	0,55 [*]	0,48 [*]	0,41 ^{ns}	0,44 [*]
P Resina	0,80 ^{***}	0,81 ^{***}	0,74 ^{***}	0,72 ^{***}	0,46 [*]	0,45 [*]
P H3A-1 mod.	0,63 ^{**}	0,57 ^{**}	0,51 [*]	0,29 ^{ns}	0,50 [*]	0,50 [*]
P H3A-2 mod.	0,67 ^{***}	0,56 ^{**}	0,52 [*]	0,38	0,30 ^{ns}	0,39 ^{ns}

^{ns}: não significativo, *: p<0,05, **: p<0,01, ***: p<0,001

4.1.3 Acidez trocável (determinada com solução KCl 1 mol L⁻¹)

Concordante com os menores valores de pH encontrados nos Andisols, o teor de Al trocável no solo determinado por extração com KCl 1 mol L⁻¹ foi mais alto para os solos 1, 2 e 6 (tabela 2).

Na maioria dos Inceptisols avaliados foram encontrados baixos teores de Al trocável, tendo somente 3 superado o nível crítico de 0,5 cmol_c L⁻¹, estabelecido

como o limite acima do qual pode diminuir o rendimento das culturas devido a toxidez por Al (BERTSCH, 1995). Tiang-Rong et al. (2012) mencionam que o arroz é geralmente uma cultura tolerante ao Al, sendo essa tolerância dependente da genética de cada variedade. Como para a variedade utilizada neste experimento não tem estudos que determinem sua tolerância ao Al, foi tomado como valor referencial na interpretação das análises o valor de $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Dentre os Inceptisols cabe destacar os altos valores de Al trocável que apresentava o solo “Palmares”.

Todos os Ultisols avaliados apresentaram problemas de acidez, um pH em água próximo de 5 e Al trocável acima do nível crítico utilizado na Costa Rica ($0,5 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$).

As quantidades de P determinadas pelos diferentes extratores mantiveram correlação negativa com o Al trocável (tabela 5), com exceção dos extratores H3A-1 modificado e H3A-2 modificado. Essa relação do P com o Al pode estar relacionada com o processo de intemperismo, como por exemplo, Walker e Syers (1976) que relatam a diminuição nas quantidades de P conforme o avanço do tempo devido ao processo de intemperismo e suas mudanças nas diferentes frações do P no solo. Outra possível causa da relação encontrada são as reações de P com o Al, que pode afetar a solubilidade do P, repercutindo tanto nas quantidades determinadas pelas diferentes metodologias de extração quanto na absorção de P pelas plantas.

Tabela 5 - Coeficientes de correlação de Spearman entre o Al trocável e os teores de P determinados por diferentes metodologias de extração

Extrator	Coeficiente de correlação (ρ)
P total	-0,51*
P Bray 1	-0,59**
P Mehlich 1	-0,64**
P Mehlich 3	-0,63**
P Olsen modificado	-0,54*
P Resina	-0,73***
P H3A-1 modificado	-0,35 ^{ns}
P H3A-2 modificado	-0,35 ^{ns}

^{ns}: não significativo, *: $p < 0,05$, **: $p < 0,01$, ***: $p < 0,001$

Entre as metodologias de extração que tiveram maior afinidade entre o P determinado e o Al trocável estão a resina troca iônica ($r = -0,73$), o Mehlich 1 ($r = -0,64$) e o Mehlich 3 ($r = -0,63$). Nos resultados do método da resina foram mais

evidentes as diminuições do teor de Presina conforme os aumentos do Al trocável, possivelmente pela precipitação do P em solução na presença de Al livre, já que como mencionado por Dobermann et al. (1994) a cinética do método da resina está governada pelo processo de difusão iônica desde a solução. Analogicamente se não existe P em solução, este não poderá passar para a resina. Os extratores com menor influencia do Al trocável foram o H3A-1 e H3A-2 apresentando baixos coeficientes de correlação. Importante mencionar que na correlação foi eliminado o solo “Palmares”, já que seu comportamento diferia completamente de todos os outros solos

Os resultados da correlação negativa encontrada para o Al trocável e o P resina, e da correlação positiva do P resina com os teores de Ca e Mg sugerem que esta metodologia é sensível às quantidades destes elementos (Al, Ca e Mg) no solo, e as principais formas de P que são determinadas pela resina poderiam corresponder a fosfatos de Ca, sendo afetada a troca do P para a resina, pelo conhecido efeito da precipitação do P que ocorre em presença do Al em solução (HAYNES; MOKOLOBATE, 2001).

4.1.4 P total

O P total foi dentre as variáveis avaliadas a que apresentou a maior variação (200 mg P kg⁻¹ de solo até mais de 2000 mg P kg⁻¹ de solo). Isto possivelmente é devido à diferente mineralogia, material de origem, grau de intemperização dos solos e uso do solo, onde por exemplo em Andisolos tem sido encontrados altos teores de P que ficam retidos no solo e não são disponíveis para as plantas (ESCUDEY et al., 2001).

4.1.5 Carbono

A variabilidade do carbono (C) nos solos também foi alta, sendo a média em torno de 22 g kg⁻¹, com mínimo de 1,6 g kg⁻¹ e máximo de 65,6 g kg⁻¹, essa variação podendo estar relacionada a diferenças de mineralogia, climáticas das áreas de coleta e manejo que são submetidos os diferentes solos.

Os solos de origem vulcânica apresentaram um maior teor de C (tabela 2), fato já relatado por vários autores. Buurman; Peterse e Almendros-Martin (2007), estudando a relação da matéria orgânica com a alofana em solos vulcânicos de

Costa Rica, descreveram a ocorrência de grande acumulação de MO possivelmente relacionada aos microporos que forma a alofana, os quais em um sistema de alta pluviosidade como na Costa Rica, influenciam a acumulação de matéria orgânica em um estágio mais avançado de decomposição (matéria orgânica secundária) devido à condição de saturação desses microporos em esse ambiente úmido, protegendo-a assim de processos de degradação.

O C orgânico nos “Inceptisols” foi em geral muito menor do que nos solos vulcânicos, o teor variou desde $7,4 \text{ g kg}^{-1}$ até $24,6 \text{ g kg}^{-1}$, provavelmente relacionado à mineralogia diferente desses tipos de solos e as condições climáticas em que estes se encontram. A maioria dos Inceptisols utilizados neste trabalho (a exceção dos solos identificados como Palmares e Bustamante), foram coletados em zonas de pouca elevação, onde as temperaturas e o regime hídrico geralmente são altos, promovendo uma rápida degradação da MO.

Teores ainda menores de C foram encontrados para a maioria dos “Ultisols”. Em termos gerais o C no solo não correlacionou com a CTC do solo (determinada com solução KCl 1 mol L^{-1}), mas apresentou relação com a CTC determinada com solução de acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ tamponada a pH 7 ($r = 0,65$) e não apresentou correlação com os teores de P determinados pelas diferentes metodologias de extração.

4.2 Resposta e comportamento dos extratores nos solos avaliados

4.2.1 Resultados da extração do P com os diferentes extratores

Como pode ser observado na tabela 6, houve diferenças importantes nos teores de P extraídos pelos diferentes extratores, por exemplo, para solos vulcânicos o Bray 1 extraiu pequenas quantidades de P, enquanto que as maiores quantidades foram obtidas com o Mehlich 1, Mehlich 3 e resina. Nesses solos, o Olsen modificado também extraiu pequenas quantidades de P, com um máximo de $11,67 \text{ mg P dm}^{-3}$ e os extratores H3A-1 e H3A-2 modificados forneceram as menores quantidades de P. A menor capacidade de extração para o Olsen com relação aos outros extratores Mehlich 1 e 3, tem sido relatada por Sims (2000), que menciona que os níveis críticos em geral para o extrator Olsen são menores, correspondendo com essa menor quantidade de P extraída. No caso que um extrator tenha boa

correlação com a resposta da planta, seu nível crítico estará em função da quantidade extraída, mas o estabelecimento desse nível crítico para extratores com pouca diferença nas quantidades determinadas do nutriente, como no caso do H3A-1 modificado e o H3A-2 modificado para solos vulcânicos, é dificultado já que pequenos erros analíticos poderiam ter maior influência sobre o resultado e consequentemente sobre a recomendação de adubação.

Tabela 6 - Teores de P em diferentes solos de Costa Rica determinados mediante distintas metodologias de extração e sua respectiva resposta em plantas de arroz quando cultivadas sobre esses solos em casa de vegetação

Solo	Ordem **	Prod. Rel. *	[P]* g kg ⁻¹	Acúm. P* mg vaso ⁻¹	P total mg kg ⁻¹	Bray 1 mg kg ⁻¹	Mehlich 1 mg kg ⁻¹	Mehlich 3 mg dm ⁻³	Olsen mod. mg dm ⁻³	Resina mg kg ⁻¹	H3A1 mod. mg kg ⁻¹	H3A2 mod. mg kg ⁻¹
		%										
1	A	43	0,83	0,8	203	0,17	1,14	4,67	1	2,32	5,89	2,23
2	A	49	0,9	1	2009	0,93	3,79	4,33	1,67	7,66	4,44	2,56
3	A	73	0,9	0,96	1249	0,44	3,18	8,67	3,67	15,22	5,37	2,89
4	A	61	0,83	0,83	760	0,55	2,4	6,33	2,33	11,71	5,09	2,56
5	A	68	0,77	0,95	1418	9,13	68,08	22	8,33	22,84	6,34	4,23
6	A	91	1,67	1,97	1021	3,36	16,24	11,33	11,67	16,66	6,43	4,72
7	A	98	1,9	2,85	751	7,46	21,42	15,5	9,33	45,89	8,83	7,22
8	I	62	0,8	0,76	1089	0,6	12,8	3,67	2,5	20,58	4,84	2,72
9	I	67	1,47	2,43	658	2,06	25,12	14	4,33	31,57	11,99	9,13
10	I	74	1,17	1,69	1553	0,93	7,36	5,67	4,67	13,17	5,15	4,4
11	I	60	1,7	1,56	489	6,16	12,45	16,67	6,67	20,34	7,27	6,23
12	I	69	1,4	2,23	844	4,65	72,29	20,67	10,67	51,44	22,57	19,84
13	I	86	2,17	4,16	608	3,3	74,88	35,33	13,33	42,07	21,96	22,57
14	I	99	4,4	9,02	1207	10,13	83,3	54	72,67	169,52	119,54	61,22
15	U	54	1,2	0,73	236	0,49	0,88	2,67	1,5	1,49	4,9	3,83
16	U	77	1,43	0,78	557	0,12	1,59	2,33	1,67	1,81	5,24	3,33
17	U	65	1,57	0,71	540	0,22	3,31	1,67	2,33	1,33	4,53	3,06
18	U	62	0,97	0,83	481	0,87	0,65	1,67	1,6	1,41	5,78	2,22
19	U	70	0,73	0,63	304	2,76	2,6	5	1,67	4,85	9,61	8,1
20	U	84	1,83	2,67	641	3,95	24,98	16	13	30,21	13,29	12,6
21	U	78	2,03	3,68	768	7,89	68,08	33	32,67	72,35	16,49	16,92

Prod. Rel.= Produtividade relativa, [P]= concentração de P na planta, Acúm. P= acúmulo de P nas plantas, mod.= modificado

*Variáveis resposta da cultura do arroz, concentração e acúmulo de P na planta determinadas no tratamento sem adição de P no experimento de resposta à adição de P (T2), ** A= Andisol, I= Inceptisol, U= Ultisol.

Tanto para Inceptisols quanto para Ultisols, os extratores H3A-1 e H3A-2 modificados extraíram maiores quantidades de P, diferente do comportamento relatado anteriormente para solos vulcânicos. Segundo Oburger et al. (2011), os ácidos orgânicos solubilizam o P mediante troca de ligante e dissolução dos metais que complexam o P (Fe e Al). Os mesmos autores relatam que para Andisols a grande quantidade de sítios de adsorção poderia acabar adsorvendo também os ácidos orgânicos e diminuindo eficácia na desorção do P.

Nos Inceptisols não foram observados problemas de extração de pequenas quantidades de P, nem de coloração dos extratos, portanto qualquer uma das metodologias apresenta viabilidade ao nível de laboratório para ser empregada como rotina, quando apresentar correlação com a resposta das plantas.

4.2.2 Correlação dos teores de P no solo com as variáveis resposta das plantas

4.2.2.1 Análise para todos os solos em geral

Produção relativa (%PR):

Segundo a análise de correlação aplicada a todos os solos com a intenção de avaliar o desempenho dos extratores em uma condição geral, os extratores que melhor correlacionaram com a produção relativa de matéria seca (%PR) segundo o coeficiente de correlação de Spearman, foram respectivamente o Olsen, H3A-2 modificado, H3A-1 modificado, Mehlich 1, Resina de troca iônica, Mehlich 3 e Bray 1. Cabe destacar que os dois métodos utilizados no Brasil para avaliação da biodisponibilidade do P no solo (Mehlich 1 e resina) apresentaram coeficiente de correlação similar (Tabela 7), mas para a resina foi possível gerar um modelo com melhor ajuste ao comportamento dos dados de produção relativa de matéria seca (figura 3). O modelo gerado para o Olsen modificado se adequou ao comportamento biológico esperado e explicou melhor a variação dos dados de produção relativa quando comparado aos outros extratores, seguido pelo método da resina (figura 3).

O extrator Olsen tem sido reconhecido pela boa correlação com a produtividade e acúmulo de P pelas plantas em diversas condições de solos. Na Costa Rica Cabalceta (1993) constatou ser viável o uso do Olsen modificado em diferentes ordens de solos. Também em solos da Europa, Delgado e Torrent (1997), avaliando vários extratores, dentre eles o Olsen, encontraram bons resultados para solos básicos, moderadamente ácidos e ácidos. Horta e Torrent (2007) concluíram que o extrator Olsen é um método adequado para a avaliação de P em solos ácidos de Portugal. Essas informações que mostram a boa correlação com a produtividade das plantas para o extrator Olsen modificado em condições de pH moderadamente ácido, contrariando alguns pesquisadores que consideram que o extrator Olsen é para solos alcalinos e neutros (MALLARINO, 1995; KROTH, 1998; NOVAIS;

SMYTH, 1999). Olsen et al. (1954) desenvolveram o extrator com a finalidade de ser utilizado em solos calcários, mas como já mencionado, com modificação tem apresentado um bom desempenho em outros tipos de solo.

Tabela 7 - Coeficientes de correlação de Spearman (ρ) e sua respectiva significância estatística para a produção relativa (%PR) e o P no solo determinado por diferentes metodologias em 3 ordens de solos da Costa Rica (n = 21)

Metodologia de extração	Coeficiente de correlação (ρ)
P total solo	0,28 ^{ns}
Bray 1	0,45*
Mehlich 1	0,55*
Mehlich 3	0,49*
Olsen modificado	0,71***
Resina	0,54*
H3A-1 modificado	0,56**
H3A-2 modificado	0,64**

^{ns}: não significativo, *: $p < 0,05$, **: $p < 0,01$, ***: $p < 0,001$

Com exceção do P total, todas as correlações da produção relativa (%PR) e o P no solo segundo as metodologias avaliadas foram estatisticamente significativas, quando realizada a análise para todos os solos, demonstrando assim a independência entre o teor total de P no solo e a produção das plantas, como relatado por Schachtman et al. 1998 e Richardson et al. 2005. Provavelmente isso está relacionado com diferenças no processo de fixação que sofre este nutriente nos distintos minerais presentes nos solos avaliados, por exemplo, em solos com predominância de alofana (Andisols), possivelmente o P é retido fortemente, e portanto altos teores não se refletiram em altas produtividades relativas nas plantas ou baixas respostas à adição de P. Para os Inceptisols, onde se espera uma predominância de minerais 2:1 e condições mais elevadas de pH e bases, tampouco houve resposta das plantas ao teor total de P no solo. No P total estão incluídas frações de P com baixa solubilidade ou insolúveis que são de pouca disponibilidade para as plantas. Méndez e Bertsch (2011), avaliando cinzas recém depositadas pelo vulcão Turrialba em Costa Rica (material expulso no ano 2010), encontraram teores totais de P extraídos pela digestão ácida com HNO_3 70% entre 400 e 500 mg P kg^{-1} de cinza, enquanto que a fração “disponível” determinada com o extrator Olsen

modificado ficou em torno de 3 a 6% desse P total, diferença de solubilidade que poderia ser refletida na absorção do P pelas plantas e resultar em baixa correlação.

Na figura 3, são apresentados os modelos de regressão para a produtividade relativa. Concordando com os resultados da análise de correlação, não foi possível ajustar um modelo que explicasse a produtividade das plantas para P total, e para o Bray 1 e Mehlich 1 não foi possível ajustar um modelo que se adequasse ao comportamento biológico que apresentam normalmente as plantas para a variável produtividade relativa em função dos teores do nutriente no solo sendo possível obter um ajuste linear, o qual não tem importância prática para esta variável. Além disso, mesmo com um modelo linear, apresentou um baixo ajuste (R^2).

O extrator que apresentou o melhor ajuste para o modelo de regressão concordante com a análise de correlação mencionada anteriormente foi Olsen modificado ($R^2=0,50$), seguido pela resina, H3A-2 modificado, Mehlich 3 e H3A-1 modificado. Esse comportamento concordante com Novais e Smyth (1999) poderia estar relacionado com a capacidade do extrator de determinar o fator capacidade do solo, em solos de uma grande variedade como a utilizada, onde provavelmente existe uma quantidade considerável de fosfatos de cálcio, os que poderiam ser mais dissolvidos pelos ácidos de extratores como Mehlich 1 e Bray1.

A partir dos modelos de regressão, foram estimados os níveis críticos pelo critério de 90% de produção relativa, com os que foram determinados em 90 mg P kg^{-1} de solo para a resina, para Mehlich 3 em 42 mg P dm^{-3} de solo, H3A-1 modificado em 35 mg P kg^{-1} de solo. Para o Olsen modificado, tendo sido o máximo atingido pelo modelo de 90% de produção relativa, o nível crítico foi estimado no ponto a partir do qual não ocorrem mudanças importantes na %PR, estabelecendo-se o teor de 15 mg P dm^{-3} de solo.

O valor de NC determinado para a solução Olsen modificada é superior ao relatado por Linqvist e Ruark (2011) para o Olsen em diversos solos dos Estados Unidos (6 mg kg^{-1}), coincidindo com o encontrado por Cordero e Miner (1975) para diversos solos de Costa Rica utilizando a cultura de arroz, porém superior ao reportado por Cabalceta e Cordero (1994), que estimaram o NC geral (4 ordens) em 10 mg P dm^{-3} utilizando o sorgo como planta indicadora.

Figura 3 - Modelos de regressão entre a produtividade relativa de matéria seca nas plantas de arroz var. Palmar 18 e os teores de P em diferentes solos de 3 distintas ordens, determinados por diferentes extratores de P. *: $p < 0,05$, **: $p < 0,01$

Para o H3A-2 modificado, o modelo atingiu o máximo de 82 % de PR, portanto utilizou-se o mesmo critério (ponto de estabilização da curva), estabelecendo o nível crítico em 10 mg P kg⁻¹ de solo. Cabe destacar a grande chance de ocorrer erros na estimação de níveis críticos mediante esta metodologia quando avaliados todos os solos em geral, já que como apresentado na figura 3 os ajustes dos modelos para todos os extratores foram relativamente baixos quando o estudo não diferenciou entre tipos de solos.

Concentração de P nas plantas ([P]):

Tanto a concentração de P na parte aérea das plantas quanto o acúmulo de P pelas mesmas, são variáveis de grande importância na avaliação e eleição de um determinado extrator, já que com os valores obtidos estima-se o aproveitamento ou absorção do nutriente que terá a planta para o seu desenvolvimento.

Avaliando a concentração de P na planta, o extrator Olsen modificado também apresentou a melhor correlação quando realizada essa extração para todos os solos sem diferenciação de ordem (tabela 8). Essa alta correlação do método Olsen modificado não diferiu muito dos coeficientes obtidos para a resina de troca iônica, o H3A-1 modificado e o H3A-2 modificado. Os extratores Mehlich 3, Bray 1 e Mehlich 1 apresentaram os menores coeficientes respectivamente, embora todos com significância estatística.

Tabela 8 - Coeficientes de correlação linear de Pearson e sua respectiva significância estatística entre a concentração de P na planta ([P]) e o teor de P no solo determinado por diferentes metodologias de extração em 3 ordens de solos de Costa Rica

Metodologia de extração	Coeficiente de correlação (r)
P total solo	0,027 ^{ns}
Bray 1	0,62 ^{**}
Mehlich 1	0,61 ^{**}
Mehlich 3	0,83 ^{***}
Olsen modificado	0,91 ^{***}
Resina	0,89 ^{***}
H3A-1 modificado	0,88 ^{***}
H3A-2 modificado	0,90 ^{***}

^{ns}: não significativo, * : p<0,05, ** p<0,01, ***: p<0,001

O P total não apresentou correlação com a concentração de P na parte aérea das plantas, (tabela 8 e figura 4), portanto não foi possível estabelecer um modelo de regressão que explicasse a [P] em função do seu teor no solo para esta variável. Para o Bray 1 e Mehlich 1, a baixa correlação com a concentração de P na planta também se refletiu na incapacidade de gerar um modelo que explicasse uma variável em função da outra.

Estes resultados respaldam a viabilidade no uso do extrator Olsen modificado para os solos de Costa Rica, corroborando com os resultados de outros pesquisadores como Cabalceta (1993) e Cordero e Miner (1975), os quais tem mencionado a vantagem de utilizar o extrator Olsen modificado como um extrator geral para os solos de Costa Rica. Cabe destacar que em termos gerais o extrator Olsen comportou-se bem, mesmo quando esta análise geral leva em consideração solos ácidos intemperizados.

Acúmulo de P nas plantas:

O extrator resina e o H3A-2 modificado apresentaram o maior coeficiente de correlação linear de Pearson com a variável acúmulo de P na parte aérea das plantas, seguido pelo Olsen modificado, Mehlich 3 e o H3A-1 modificado, todos com altos coeficientes de correlação, e altamente significativos (tabela 9, figura 5). Essa melhor correlação se refletiu também em um melhor ajuste nos modelos de regressão (R^2). A baixa correlação do extrator Bray 1 com o acúmulo de P nas plantas de arroz é concordante com os resultados de outros autores. Silva et al. (2008), relatam uma baixa correlação quando este extrator foi avaliado em diferentes solos de várzea de Rio Grande do Sul. Linquist e Ruark (2011) também encontraram para Bray 1 resultados pouco adequados na avaliação do P disponível para as plantas de arroz em uma grande diversidade de solos, nos quais o Olsen apresentou melhor correlação do que o Bray 1.

Figura 4 - Modelos de regressão linear entre os teores de P no solo determinados por distintos extratores e a concentração de P nas plantas de arroz cultivadas em 21 diferentes solos de Costa Rica. * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

Tabela 9 - Coeficientes de correlação linear de Pearson e sua respectiva significância estatística entre a concentração de P na planta ([P]) e o teor de P no solo determinado por diferentes extratores em 3 ordenes de solos de Costa Rica

Metodologia de extração	Coeficiente de correlação (r)
P total solo	0,15 ^{ns}
Bray 1	0,67 ^{***}
Mehlich 1	0,73 ^{***}
Mehlich 3	0,92 ^{***}
Olsen modificado	0,95 ^{***}
Resina	0,96 ^{***}
H3A-1 modificado	0,92 ^{***}
H3A-2 modificado	0,96 ^{***}

^{ns}: não significativo, ^{*}: p<0,05, ^{**}: p<0,01, ^{***}: p<0,001

O P total, não apresentou correlação com o acúmulo de P nas plantas de arroz na avaliação geral dos 3 tipos de solo. O extrator Olsen modificado apresentou correlação similar à apresentada pela resina com o acúmulo de P nas plantas, portanto afiançam seu uso como extratores de rotina em condições gerais. O extrator Mehlich 3 também mostrou um bom desempenho para todos os solos em geral, com valores de correlação de Pearson altamente significativos para o acúmulo de P e concentração de P nas plantas de arroz.

Na figura 5 são apresentados os modelos de regressão para o acúmulo de P nas plantas de arroz em função do teor de P no solo, segundo as diferentes metodologias de extração e determinação de P. O melhor ajuste (R^2) dos modelos de regressão foi obtido para o extrator resina ($R^2 = 0,92$), valor superior ao obtido por Palma e Fassbender (1970) ($R^2 = 0,86$) utilizando outro tipo de resina em diversos solos de América Central. A maioria das metodologias de extração obtiveram bons ajustes (R^2 superior a 0,84), ou seja grande parte da variação foi explicada pelo modelo. Somente para o Bray 1 e Mehlich 1, os quais apresentaram menor correlação, o modelo gerado não conseguiu explicar grande parte da variação ($R^2 = 0,45$ e $0,53$ respectivamente), indicando que estes extratores não são os mais apropriados para avaliar o P disponível em solos de diversos tipos.

Figura 5 - Modelos de regressão linear entre o teores de P no solo determinados por diferentes extratores e o acúmulo de P nas plantas de arroz cultivadas em 3 diferentes tipos de solos

Fazendo uma análise das diferentes formas em que foi testada a funcionalidade de cada extrator para refletir as variáveis das plantas, os melhores extratores para uma condição geral foram o Olsen modificado, resina de troca iônica, H3A2 e H3A1, com a ressalva dos problemas apresentados pelo extrator H3A-1 e H3A-2 para alguns tipos de solo, principalmente Andisols.

Comparativamente o método da resina não mostrou um desempenho superior ao apresentado pelo Olsen modificado, o que é refletido na superioridade do Olsen modificado nos resultados do coeficiente de correlação de Spearman com a produtividade relativa e no coeficiente de correlação linear de Pearson para a concentração e também na similaridade do coeficiente de correlação linear para o acúmulo de P na planta (tabelas 7, 8 e 9), o que também se refletiu no ajuste dos modelos de regressão gerados (figuras 3, 4 e 5). Esses resultados contrastam com o relatado por Raij (1978), que fazendo uma revisão sobre o assunto encontrou um maior coeficiente de determinação para o método da resina em relação ao Olsen, com base nos resultados de diversos autores em diversos tipos de solo, embora o método Olsen empregado nesses estudos tivesse sido o original (OLSEN et al., 1954) e não sua modificação com EDTA que foi avaliada neste estudo (DÍAZ-ROMEU; HUNTER, 1978).

No mesmo estudo de Raij (1978) é mencionada a superioridade do método Olsen sobre o Bray 1 em condições de solos de diversas partes do mundo.

O método da resina apresentou superioridade em relação ao outro método utilizado atualmente na Costa Rica (Mehlich 3). O resultado da superioridade do método da resina sobre o extrator Mehlich 1 encontrado neste estudo também é concordante com o relatado por outros autores (PALMA; FASSBENDER, 1970; RAIJ, 1978, RAIJ, 1986).

4.2.2.2 Resposta da planta e correlação com os extratores para cada tipo de solo

4.2.2.2.1 Andisols

Pela análise de correlação entre os teores de P no solo determinados por diferentes extratores e a produção relativa de matéria seca nas plantas de arroz, dentro de Andisols (Tabela 10), o extrator Olsen modificado e o extrator resina troca

iônica foram os que melhor representaram a resposta da planta à condição de P no solo e a adição de P fertilizante. Essa boa correlação refletiu-se em altos valores do coeficiente de determinação (R^2) nos modelos de regressão (figura 6)

Os extratores Mehlich 3 e H3A-2 modificado apresentaram correlação positiva e significativa com a produtividade relativa, mas ainda assim, foram menores do que a apresentada pelo Olsen modificado e pela resina. Portanto o H3A-2 modificado e o Mehlich 3 parecem ficar menos relacionadas às respostas da planta quando adicionado o fertilizante nessas condições de P no solo e portanto menos adequadas. Para o H3A-2 modificado foi possível obter modelos com altos coeficientes de determinação em relação à produção relativa de matéria seca.

Tabela 10 - Coeficientes de correlação de Spearman (ρ) e sua respectiva significância estatística para a % de produção relativa e o teor de P no solo determinado por diferentes metodologias em Andisols de Costa Rica

Metodologia de extração	Coeficiente de correlação (ρ)
P total solo	-0,04 ^{ns}
Bray 1	0,57 ^{ns}
Mehlich 1	0,64 ^{ns}
Mehlich 3	0,75 [*]
Olsen modificado	0,93 ^{***}
Resina	0,89 ^{***}
H3A-1 modificado	0,71 ^{ns}
H3A-2 modificado	0,82 [*]

^{ns}: não significativo, ^{*}: $p < 0,05$, ^{**}: $p < 0,01$, ^{***}: $p < 0,001$

Para a concentração de P nas plantas e sua relação com os teores de P determinados por diferentes extratores no solo, na maioria dos extratores essa correlação não foi significativa quando avaliada ao 5% de probabilidade (tabela 11 e figura 7), com exceção do H3A-1 e o H3A-2 modificados, que obtiveram essa significância. Já quando diminuído o rigor da análise ($p < 0,1$), os extratores Olsen modificado e resina resultaram significativas. É importante mencionar que devido ao efeito de “concentração-diluição” a concentração de P no tecido foliar não é a variável mais apropriada para avaliar a disponibilidade do P para as plantas, sendo melhor a utilização do acúmulo do nutriente nas plantas.

Figura 6 - Modelos de regressão entre a produtividade relativa das plantas de arroz var. Palmar 18 e os teores de P determinados por diferentes extratores em solos vulcânicos de Costa Rica (Andisols)

^{ns}: modelo de regressão não significativo, *: $p < 0,05$, °: $p < 0,1$

Tabela 11 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) para a concentração de P nas plantas de arroz var. Palmar 18 e o teor de P no solo determinado por diferentes metodologias em Andisols de Costa Rica

Metodologia de extração	Coeficiente de correlação (r)
P total solo	-0,19 ^{ns}
Bray 1	0,39 ^{ns}
Mehlich 1	-0,05 ^{ns}
Mehlich 3	0,27 ^{ns}
Olsen modificado	0,74 [°]
Resina	0,72 [°]
H3A-1 modificado	0,78 [*]
H3A-2 modificado	0,91 ^{**}

^{ns}: não significativo, °: p<0,1, *: p<0,05, **: p<0,01, ***: p<0,001

É importante destacar que nos extratos obtidos com “H3A” modificados, neste tipo de solos, apresentaram coloração amarela e as quantidades de P obtidas foram muito baixas. Segundo Haney et al. (2010), a modificação do extrator original solucionava esses problemas (HANEY et al., 2006), o que não se observou. Essas dificuldades podem inviabilizar a utilização dessas metodologias (H3A) e dificultar a interpretação das análises, já que coloração e essas pequenas quantidades de P extraídas predispõem ao aumento de interpretações errôneas. Como mencionam Oburger et al. (2011), os ácidos fracos tem pouco poder de extração em solos com alta capacidade de adsorção como os Andisols, o que pode explicar as pequenas quantidades de P no extrato, mesmo nos solos com altas quantidades de P total.

Os valores de acúmulo de P nas plantas do arroz apresentaram alta correlação com os valores de P obtidos com os extratores H3A, estes parecem ser adequados para avaliar o P disponível no solo para as plantas em Andisols de Costa Rica. Os problemas de coloração nos extratos e baixa quantidade de P extraída, porém podem inviabilizar seu uso. P total, Bray 1 e Mehlich 1 não apresentaram correlação com nenhuma das variáveis avaliadas nas plantas do arroz quando cultivadas sobre os solos vulcânicos. Assim, os extratores resina de troca iônica e Olsen modificado foram os melhores extratores para esses solos. Por outro lado o Mehlich 3 não apresentou correlação significativa com o P acumulado pelas plantas de arroz tabela 12 e figura 8).

Figura 7 - Modelos de regressão entre os teores de P determinados mediante diferentes extratores em solos vulcânicos de Costa Rica (Andisols) e a concentração de P nas plantas de arroz var. Palmar 18. ° $p < 0,1$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$

Tabela 12 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) e sua respectiva significância estatística para o acúmulo de P nas plantas de arroz var. Palmar 18 e o teor de P no solo determinado por diferentes metodologias em Andisols de Costa Rica

Metodologia de extração	Coeficiente de correlação (r)
P total solo	-0,15 ^{ns}
Bray 1	0,52 ^{ns}
Mehlich 1	0,11 ^{ns}
Mehlich 3	0,39 ^{ns}
Olsen modificado	0,73 [°]
Resina	0,84 [*]
H3A-1 modificado	0,87 [*]
H3A-2 modificado	0,97 ^{***}

^{ns}: não significativo, [°]: p<0,1, ^{*}: p<0,05, ^{**}: p<0,01, ^{***}: p<0,001

Entre os 2 extratores atualmente utilizados na Costa Rica (Olsen modificado e Mehlich 3), o Olsen apresentou superioridade na predição do P disponível para as plantas em todas as variáveis avaliadas, o que sugere a preferência pela utilização do extrator Olsen modificado sobre o Mehlich 3 em solos vulcânicos. Atualmente o extrator Olsen modificado é o mais usado em este tipo de solos na Costa Rica.

Níveis críticos de P em Andisols para diferentes extratores:

Os níveis críticos (NC) de P para os extratores com maior potencial de uso foram determinados por modelos de regressão (figura 6) e utilizando o critério de 85% da %PR. Para resina foi encontrado um nível crítico de 26 mg P kg⁻¹ de solo; para Olsen modificado, 9 mg P dm⁻³ de solo; para H3A-2 modificado, 5 mg P kg⁻¹ de solo; H3A-1 modificado, 7,5 mg P kg⁻¹ de solo e para Mehlich 3, 16 mg P dm⁻³ solo. Para os outros extratores, devido à baixa correlação com a produtividade relativa da planta, concentração e acúmulo de P, não foi determinado o nível crítico de P no solo.

O NC do extrator Olsen modificado difere do encontrado por Cabalceta e Cordero (1994), que avaliando 25 solos vulcânicos da Costa Rica o estabeleceram em 18 mg P dm⁻³ de solo, possivelmente pela metodologia gráfica de Cate e Nelson usada para determinar o NC, não modelos de regressão. Outra diferença é que no presente estudo nenhum dos Andisols apresentou teores de P altos, próximos aos valores apresentados por Cabalceta e Cordero (1994), sendo portanto recomendável, um estudo mais detalhado neste tipo de solos.

Figura 8 - Modelos de regressão entre os teores de P determinados por diferentes extratores em solos vulcânicos de Costa Rica (Andisols) e o acúmulo de P nas plantas de arroz var. Palmar 18. ° $p < 0,1$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$

Para o extrator resina o NC determinado foi semelhante ao utilizado na interpretação das análises de P em resina no Estado de São Paulo, Brasil, embora em outros tipos de solo, localizado-se dentro da faixa de interpretação de uma fertilidade média, com a qual espera-se uma produtividade relativa acima do 90% (RAIJ et al., 1997).

Para os extratores “H3A”, que são relativamente novos, não existem ainda NC. Haney et al. (2006) e Haney et al. (2010) que desenvolveram o método, somente avaliaram seu poder de extração comparando com outros métodos de extração.

Para o Mehlich 3 o NC foi semelhante ao proposto por Cabalceta e Cordero (1994) de 16 mg P dm⁻³.

4.2.2.2 Inceptisols

Produtividade relativa (%):

Para os Inceptisols, a melhor correlação com a %PR de matéria seca foi para os extratores Olsen modificado e H3A-2 modificado, seguido por Mehlich 1, Mehlich 3 e H3A-1 modificado (tabela 13). Apenas os extratores Olsen modificado, H3A-2 modificado, Mehlich-1, Mehlich-3 e H3A-1 apresentaram correlação significativa, para os demais extratores a correlação não foi significativa (tabela 13).

Tabela 13 - Coeficientes de correlação de Spearman (ρ) para a produção relativa (%) em plantas de arroz var. Palmar 18 e o P no solo determinado por diferentes metodologias em Inceptisols da Costa Rica

Metodologia de extração	Coeficiente de correlação (ρ)
P total solo	0,46 ^{ns}
Bray 1	0,29 ^{ns}
Mehlich 1	0,64°
Mehlich 3	0,64°
Olsen modificado	0,71°
Resina	0,57 ^{ns}
H3A-1 modificado	0,64°
H3A-2 modificado	0,71°

^{ns}: não significativo, °: $p < 0,1$

A maior correlação para os extratores Olsen modificado e H3A-2 também refletiu num maior coeficiente de determinação nos modelos da produção relativa de

matéria seca pelo teor de P no solo (figura 9), entre esses dois extratores o Olsen modificado apresentou maior similaridade com o comportamento biológico esperado pelas plantas.

Figura 9 - Modelos de regressão entre a produtividade relativa das plantas de arroz var. Palmar 18 e os teores de P determinados por diferentes extratores em Inceptisols da Costa Rica. * $p < 0,05$, ** $p < 0,1$

Para resina não foi possível gerar um modelo que se ajustasse ao comportamento esperado das plantas, nos quais em baixos teores de P espera-se grandes aumentos na produção relativa de matéria seca com pequenos aumentos no teor de P no solo, e posteriormente esses aumentos decrescem até estabilizar e atingir um máximo. Tanto a resina quanto o Mehlich 1 e H3A-2 obtiveram um comportamento quase linear (Figura 9), portanto não parecem ser os mais adequados para avaliar as respostas da adição do P neste tipo de solos.

Para o P total e o Bray 1 não foi possível ajustar um modelo que pudesse explicar a produção relativa de matéria seca.

Concentração de P e acúmulo de P nas plantas:

Para os Inceptisols a maioria dos extratores apresentaram alta correlação com concentração de P e acúmulo de P nas plantas de arroz. Os extratores Mehlich 3, Olsen modificado, resina troca iônica, H3A-1 modificado e H3A-2 modificado apresentaram correlação superior a 0,95 (tabela 14) com a concentração de P. A mesma situação ocorreu para o acúmulo de P, onde os coeficientes de correlação também apresentaram valores superiores a 0,95 (tabela 15).

Os resultados dessas altas correlações indicam que qualquer um desses extratores poderia ser utilizado para prever a absorção do P pelas plantas.

A produção relativa mede o rendimento atingido pelas plantas cultivadas no solo na condição original de P, em relação a plantas desenvolvidas no mesmo solo em uma condição adubada, onde o 100% representa a máxima produtividade atingida.

As únicas metodologias que obtiveram boa correlação com as 3 variáveis foram o Olsen modificado e o H3A-2 modificado. Entretanto, o Olsen modificado obteve um modelo que se ajusta melhor ao comportamento biológico esperado pelas plantas, o que não ocorreu para o H3A-2 modificado. A produtividade relativa é uma variável que não explica exatamente as quantidades de P absorvidas pela planta, sendo mais precisamente, um índice relacionado com a resposta à adição de P fertilizante, portanto muito importante também na escolha de um método de extração e determinação do P disponível para a cultura.

A boa correlação apresentada para concentração de P e acúmulo de P na planta são refletidas nos modelos de regressão (figuras 10 e 11). Os maiores teores

de P no solo nos diferentes extratores corresponderam com maiores teores e acúmulos de P nas plantas de arroz. Vale ressaltar que esse maior acúmulo de P nas plantas não mostra se elas ainda têm potencial de resposta à adubação fosfatada nessas condições de solo.

Dentre os extratores utilizados no mundo comumente como rotina nos laboratórios de fertilidade do solo, o extrator Mehlich 1 e o Bray 1, foram os menos eficientes em explicar a fertilidade de P para as plantas de arroz em Inceptisols da Costa Rica (tabelas 14 e 15 e figuras 10 e 11).

Tabela 14 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) para a concentração de P em plantas de arroz var. Palmar 18 e o respectivo teor de P no solo determinado por diferentes extratores em Inceptisols da Costa Rica (n = 7)

Extratores	Coeficiente de correlação (r)
P total solo	0,08 ^{ns}
Bray 1	0,88 ^{**}
Mehlich 1	0,69 [°]
Mehlich 3	0,95 ^{**}
Olsen modificado	0,97 ^{***}
Resina	0,95 ^{**}
H3A-1 modificado	0,96 ^{***}
H3A-2 modificado	0,96 ^{***}

^{ns}: não significativo, °: p<0,1, *: p<0,05, **: p<0,01, ***: p<0,001

Tabela 15 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) para o acúmulo de P em plantas de arroz var. Palmar 18 e o teor de P no solo determinado por diferentes extratores em Inceptisols da Costa Rica

Metodologia de extração	Coeficiente de correlação (r)
P total solo	0,15 ^{ns}
Bray 1	0,80 [*]
Mehlich 1	0,74 [°]
Mehlich 3	0,95 ^{**}
Olsen modificado	0,96 ^{***}
Resina	0,96 ^{***}
H3A-1 modificado	0,97 ^{***}
H3A-2 modificado	0,98 ^{***}

^{ns}: não significativo, °: p<0,1, *: p<0,05, **: p<0,01, ***: p<0,001

Figura 10 - Modelos de regressão entre os teores de P determinados mediante diferentes extratores em solos aluviais da Costa Rica (Inceptisols) e a concentração de P nas plantas de arroz var. Palmar 18. ° $p < 0,1$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

Figura 11 - Modelos de regressão entre os teores de P determinados por diferentes extratores de P em Inceptisols da Costa Rica e o acúmulo de P nas plantas de arroz var. Palmar 18. °: $p < 0,1$, *: $p < 0,05$, **: $p < 0,01$, ***: $p < 0,001$

Algumas correlações encontradas neste estudo diferiram daquelas obtidas por outros autores, por exemplo, a alta correlação entre o acúmulo de P nas plantas de arroz e o teor de P no solo para Mehlich 3 ($r = 0,95$), contrasta com o encontrado por Silva et al. (2008), que, avaliando, esse extrator em solos de várzea, obtiveram um coeficiente de correlação muito inferior ($r = 0,47$). No mesmo estudo os autores não encontraram para o extrator Bray 1 correlação significativa com a resposta das plantas, sendo o que apresentou a menor correlação dentre os extratores ácidos. O Bray 1 junto com o Mehlich 1, neste estudo também apresentaram as correlações mais baixas, embora significativa para Bray 1 (tabela 15).

Por outro lado para o extrator Mehlich 3, utilizando um critério de 80 % da produção relativa o NC ficou em 26 mg P dm⁻³, para Olsen modificado em 15 mg P dm⁻³, para H3A-1 em 30 mg P kg⁻¹ e para H3A-2 foi de 25 mg P kg⁻¹. Para os outros extratores, como já mencionado, não foi possível obter um NC devido às dificuldades de gerar os modelos ou que os mesmos não representavam a resposta biológica.

O nível crítico do extrator Mehlich 3 apresentado neste estudo difere do encontrado por Cabalceta e Molina (2006), que utilizando sorgo e mediante estudo em casa de vegetação o estabeleceram em 6 mg P dm⁻³ para este tipo de solos.

Para o caso do extrator Olsen modificado, o NC segundo este estudo (15 mg P dm⁻³) também foi superior ao determinado por Cabalceta e Cordero (1994), que avaliando 25 Inceptisols de Costa Rica o estabeleceram em 7 mg P dm⁻³.

Como mencionado no item de caracterização dos solos, os Inceptisols utilizados neste estudo são, em sua maioria, solos de fertilidade alta (tabela 2), razão que poderia ter influenciado nesses resultados de NC maiores em relação ao estudo de Cabalceta e Molina e Cabalceta e Cordero, já que possivelmente as plantas nesses solos não tiveram limitação por outros nutrientes, podendo expressar seu potencial, portanto apresentando uma alta demanda de P e incrementando os NC.

Para o caso do Mehlich 1 nestes solos não foi possível obter um modelo com comportamento biológico a partir do que poderia ser estimado o NC. Fageria, Santos e Baligar (1997) trabalhando com Inceptisols, determinaram que para obter produções relativas entre 70 e 95%, eram necessários teores de P no solo entre 2,6 e 8,8 mg P kg⁻¹ solo, e no presente estudo os solos apresentaram valores de P mais altos, mas segundo o modelo (linear) para atingir produções relativas superiores a 70 %, são requeridos teores de P Mehlich 1 superiores a 28 mg P kg⁻¹ solo.

Todas essas diferenças com pesquisas anteriores reafirmam a necessidade de calibração das metodologias para cada condição de solo nas diferentes regiões do mundo. Exemplo disso é a falta de correlação do método da resina de troca iônica com a produção relativa de matéria seca no presente estudo, método utilizado em diversas regiões do mundo com bons resultados.

4.2.2.2.3 Ultisols

Produção relativa

Os Ultisols comportaram-se de forma especial, pois não foi possível obter correlações significativas com a % PR de matéria seca para a maioria dos extratores (tabela 16), com exceção para o P total, que foi obtida a significância estatística. Segundo Yang e Post (2011) as frações oclusas são as que predominam em solos mais intemperizados (alto grau de saturação do P nos óxidos e hidróxidos de Fe e Al), enquanto que as frações mais lábeis encontram-se em menor quantidade explicando o baixo desempenho dos extratores normalmente utilizados para avaliação da fertilidade de P no solo. A correlação positiva entre o P total e a %PR, provavelmente se deve a uma série de mecanismos que as plantas ativam em situações de deficiência de P, tais como exsudação de ácidos orgânicos em diferentes plantas (DONG et al., 2004; HOFFLAND et al., 2006; ZHANG et al., 1997), além de fosfatases (ZHANG et al., 2011), com as quais poderiam acessar a frações de P que são consideradas não disponíveis ou de baixa disponibilidade.

Tabela 16 - Coeficientes de correlação de Spearman (ρ) para a % de produção relativa e o P no solo determinado por diferentes extratores em Ultisols da Costa Rica

Metodologia de extração	Coeficiente de correlação (ρ)
P total solo	0,75 [°]
Bray 1	0,10 ^{ns}
Mehlich 1	0,54 ^{ns}
Mehlich 3	0,41 ^{ns}
Olsen modificado	0,63 ^{ns}
Resina	0,61 ^{ns}
H3A-1 modificado	0,46 ^{ns}
H3A-2 modificado	0,53 ^{ns}

^{ns}: não significativo, [°] $p < 0,1$

A baixa correlação dos extratores de rotina nos solos mais intemperizados com a % PR, explicam, em parte, a grande quantidade de trabalhos que tem sido publicados a várias décadas avaliando extratores de P, principalmente, em solos ácidos intemperizados (BRASIL; MURAOKA, 1997; CABALCETA 1994, HOLANDA et al., 1995; RAIJ; TEXEIRA, 1984; SOUZA JUNIOR et al., 2012; TCHUENTEU, 1994). Essa grande quantidade de estudos possivelmente é consequência da falta de correlação com as respostas das plantas à adubação fosfatada. Para o caso do P total, foi gerado o modelo de regressão (figura 12), com um baixo R^2 (0,54), porém ao contrario do esperado, melhor que todos os extratores, com exceção do Mehlich 1 ($R^2=0,56$). Entre os demais extratores a resina foi o melhor com $R^2=0,53$.

Os outros extratores avaliados em este estudo obtiveram pequenas quantidades de P na maioria dos solos, valores que não corresponderam com a produtividade relativa. Para o extrator Olsen modificado cinco solos obtiveram valores entre 1,5 e 2,33 mg P dm⁻³ (tabela 6), que são considerados como muito baixos (CABALCETA, 1994), e devido a essa proximidade entre os valores esperavam-se produtividades relativas similares, mas como apresentado na figura 12, foram encontradas diferenças que não puderam ser relacionadas com os resultados do extrator. Mesma situação ocorreu para os extratores Mehlich 1, Mehlich 3 e resina. A falta de correlação encontrada em este experimento para o extrator Olsen modificado contrasta com o relatado por Kartika e Susila (2007), que avaliando vários extratores em Ultisols da Indonésia encontraram a maior correlação com a produtividade relativa para este extrator nas culturas de pimento, tomate e Amarantho.

Importante mencionar que em este estudo a máxima produtividade atingida no tratamento sem adição de P em relação ao tratamento adubado (%PR) foi de 84%, o que indica a tendência de resposta à adição de P nestes solos, mesmo em condições de “alto” teor de P determinado pelos extratores Olsen modificado, resina, Mehlich 3. Se utilizado o critério de 85% da produção relativa como valor para determinar o NC, todos os solos avaliados em este estudo houvessem requerido adubação fosfatada, isto sem considerar se a resposta ao fertilizante é significativa estatística e economicamente.

Figura 12 - Modelos de regressão entre a produtividade relativa das plantas de arroz var. Palmar 18 e os teores de P determinados por diferentes extratores em Ultisols da Costa Rica. ns: modelo de regressão não significativo, °: $p < 0,1$

Concentração e Acúmulo de P nas plantas:

O P total também foi a variável que melhor correlacionou com a concentração de P na planta (tabela 17), além de obter o melhor ajuste no modelo linear gerado entre os teores no solo e a concentração de P na planta (figura 13). Já para o acúmulo de P, foi obtido um alto coeficiente de correlação, mas inferior ao apresentado para os outros extratores.

O acúmulo de P parece de fato ser uma variável muito adequada para a seleção do melhor extrator, pois tanto a produtividade relativa quanto a concentração de P na planta apresentaram valores altos em solos com baixo teor de P, enquanto a variável acúmulo de P nas plantas, não se observou esse problema figura 14. Os resultados de Sahrawat (2008) reforçam a importância que tem o acúmulo de P como variável para eleição de um extrator de P, esse pesquisador avaliando a cultura de arroz durante vários anos em um Ultisol de África encontrou altos coeficientes de correlação entre o rendimento de grãos e o acúmulo de P (superiores a 0,796).

Tabela 17 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a concentração de P nas plantas de arroz var. Palmar 18 e o respectivo teor de P no solo determinado por diferentes extratores em Ultisols da Costa Rica

Metodologia de extração	Coeficiente de correlação (r)
P total solo	0,84*
Bray 1	0,57 ^{ns}
Mehlich 1	0,75*
Mehlich 3	0,73°
Olsen modificado	0,76*
Resina	0,74°
H3A-1 modificado	0,57 ^{ns}
H3A-2 modificado	0,63 ^{ns}

^{ns}: não significativo, °: p<0,1, *: p<0,05

A concentração de P pode apresentar esses problemas devido ao efeito diluição/concentração, fenômeno amplamente explicado por Jarrel e Beverly (1981), onde o aumento na concentração do nutriente é devido ao baixo crescimento das plantas, enquanto que nas plantas com maior desenvolvimento essa concentração é diluída no tecido formado. Esse efeito poderia ser o responsável do comportamento observado na figura 13, onde há maiores concentrações de P na planta em solos com valores muito similares de P, enquanto que quando é avaliado o acúmulo de P

(tabela 18 e figura 14), esse problema é eliminado ou diminuído e os dados mostram maior concordância com os teores de P no solo.

Figura 13 - Modelos de regressão entre os teores de P determinados por diferentes extratores e a concentração de P nas plantas de arroz var. Palmar 18 cultivadas em solos intemperizados da Costa Rica (Ultisols). ° $p < 0,1$, * $p < 0,05$, ns modelo de regressão não significativo

Figura 14 - Modelos de regressão entre os teores de P determinados por diferentes extratores de P em Ultisols da Costa Rica e o acúmulo de P nas plantas de arroz var. Palmar 18.

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

Tabela 18 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre o acúmulo de P nas plantas de arroz var. Palmar 18 e o teor de P no solo determinado por diferentes extratores em Ultisols da Costa Rica

Metodologia de extração	Coeficiente de correlação (r)
P total solo	0,78*
Bray 1	0,92**
Mehlich 1	0,96***
Mehlich 3	0,97***
Olsen modificado	0,96***
Resina	0,97***
H3A-1 modificado	0,92**
H3A-2 modificado	0,93**

*: $p < 0,05$, **: $p < 0,01$, ***: $p < 0,001$

Grande et al. (1986), trabalhando também com arroz em solos ácidos do Brasil, encontraram melhor correlação do P determinado pela resina de troca iônica em relação ao P Mehlich 1 para a variável acúmulo de P. Neste trabalho o extrator Mehlich 1 mostrou um alto coeficiente de correlação com o acúmulo de P nas plantas de arroz ($r = 0,96$), o que foi similar ao apresentado pela resina de troca iônica, Mehlich 3 e Olsen modificado (0,97; 0,97 e 0,96 respectivamente). Para o acúmulo de P, os extratores que obtiveram os maiores coeficientes de determinação (R^2) foram Mehlich 3 (0,95), resina (0,94), Olsen modificado (0,93) e Mehlich 1 (0,92)

4.2.3 Resposta do arroz à adição de P nos solos

Como o objetivo do trabalho gira em torno da resposta dos tratamentos (adição de P) dentro de solos com diferentes teores de P, não é apresentada uma análise da variância geral para o experimento completo, com os respectivos desdobramentos para solos, tratamentos e sua interação solo x tratamento para a produção de matéria seca das plantas de arroz. Portanto somente foi realizada a análise da variância para cada solo (individual) e apresentados os resultados numa tabela de médias com sua respectiva diferença estatística, mediante o respectivo teste de t (LSD 5%) para os tratamentos em cada solo (tabela 19).

Tabela 19 - Média da produção de matéria seca dos tratamentos para cada solo com sua respectiva diferença estatística avaliada mediante análise de variância e comparação pelo teste LSD (5%)

Solo	Ordem	Média de tratamentos (g)					
		Testemunha		Com P		Sem P	
1	Andisol	0,97	b	2,20	a	0,87	b
2	Andisol	1,05	b	2,29	a	1,10	b
3	Andisol	1,06	b	1,39	a	1,12	b
4	Andisol	0,96	b	1,56	a	0,92	b
5	Andisol	1,41	a	1,71	a	1,20	a
6	Andisol	1,38	a	1,37	a	1,23	a
7	Andisol	1,48	a	1,62	a	1,54	a
8	Inceptisol	0,79	b	1,51	a	0,98	b
9	Inceptisol	1,59	b	2,47	a	1,57	b
10	Inceptisol	1,24	b	2,07	a	1,38	b
11	Inceptisol	0,93	b	1,46	a	0,88	b
12	Inceptisol	1,51	b	2,30	a	1,42	b
13	Inceptisol	1,82	a	2,06	a	1,79	a
14	Inceptisol	2,44	a	2,20	a	2,22	a
15	Ultisol	0,54	b	1,22	a	0,66	b
16	Ultisol	0,23	c	0,71	a	0,55	b
17	Ultisol	0,33	b	0,82	a	0,54	ab
18	Ultisol	0,61	c	1,33	a	0,82	b
19	Ultisol	0,56	b	1,22	a	0,83	b
20	Ultisol	1,60	a	1,67	a	1,38	a
21	Ultisol	1,80	a	2,37	a	1,95	a

Letras comparam horizontalmente os tratamentos para cada solo

Os Andisols identificados como 1, 2, 3 e 4 responderam significativamente à adição de P respeito à produção de matéria seca das plantas, enquanto que nos solos identificados como 5, 6 e 7 as respostas à adição de P não foram estatisticamente significativas quando realizada a análise para cada solo. Esses solos (5, 6 e 7) apresentaram teores de P no solo (Tabela 6) determinados em solução Mehlich 3 superiores a 11,33, em resina de troca iônica superiores a 16,7, para H3A-1 modificado superiores a 6,34, e para H3A-2 modificado acima de 4,29. A pequena quantidade extraída pelos extratores tipo “H3A”, poderia dificultar o estabelecimento de um limite de resposta à adição de P (nível crítico). Oburger et al. (2011), avaliando o efeito de ácidos orgânicos na desorção de P em diferentes tipos de solo, encontraram poucos efeitos à adição dos diferentes ácidos orgânicos aniônicos (ac. cítrico, málico, oxálico e malonato) num Andisol de grande capacidade de adsorção. Os autores relatam que, para conseguir uma adequada desorção do P

em solos como esse, deveriam ser aplicadas altas concentrações desses ácidos, maiores do que as utilizadas para outros tipos de solos. Portanto existe a possibilidade que aumentando as concentrações desses ácidos, possam se conseguir maiores quantidades de P nos extratos deste tipo de metodologia, o que deve ainda ser pesquisado, já que além da necessidade de determinar a concentração ótima para esses solos, devem ser feitas as calibrações com a resposta da planta.

No caso dos Andisols em que não houve resposta significativa à aplicação de P (5, 6 e 7), os teores de P obtidos com o extrator Olsen modificado ficaram acima de 8,33. Relacionando esse resultado das análises de variância com o NC da regressão (figura 6 e tabelas 6 e 19), percebe-se que para o extrator Olsen modificado o NC apresenta valores similares quando determinado por ambas as metodologias estudadas (regressão e ANOVA) 9 e 8,33 mg P dm⁻³ respectivamente, teores muito inferiores ao nível crítico (18 mg P L⁻¹) reportado por Cabalceta e Cordero (1994) para solos vulcânicos (Andisols) de Costa Rica. Para os extratores H3A-1 e H3A-2 também foi encontrada similaridade entre os valores do NC determinado pela regressão e pela resposta à adubação fosfatada segundo a análise de variância (7,5 e 6,34 mg P kg⁻¹ solo para H3A-1 e 6,43 e 4,23 mg P kg⁻¹ solo para H3A-2), respectivamente).

Para o extrator resina em solos vulcânicos o NC da regressão (26 mg P kg⁻¹ solo) ficou acima do teor de P a partir do qual não foram constatadas respostas significativas segundo a análise de variância (figura 6 e tabela 6) (dados no item “Resposta à adição de P nos diferentes solos”) (16 mg P kg⁻¹ solo)

Para o Mehlich 3 em solos vulcânicos o NC foi semelhante ao proposto por Cabalceta e Cordero (1994) de 16 mg P dm⁻³, mas para o caso de comparação desse NC com a resposta à adição de P através da análise de variância, a resposta foi não significativa já a menores valores que o mencionado anteriormente, sendo que a partir de 11,33 mg P dm⁻³ solo não foram constatadas respostas significativas à adição de P.

Cabe destacar que em solos com alta capacidade de fixação de fosfatos como os Andisols, a falta de resposta não significa necessariamente que foi atingido o limite a partir do qual as adições de P não repercutem na produção (nível crítico), já que essa similaridade entre tratamentos também poderia estar relacionada com uma rápida e grande adsorção do P aplicado, com o qual o nutriente poderia não

ficar disponível para sua absorção pelas plantas em um curto período de tempo, obtendo-se assim similaridade estatística entre os tratamentos com aplicação de P e sem aplicação. Exemplo dessa grande sorção que apresentam normalmente os solos vulcânicos é relatada por Beck, Robarge e Buol (1999), que mencionam que isso poderia estar relacionado à troca de fosfato por compostos orgânicos dos complexos organominerais das superfícies dos óxidos de Fe e Al.

Nos Inceptisols, os solos que não apresentaram resposta significativa à adição de P foram o 13 e 14 (Tabela 19), correspondendo com teores de P em Olsen modificado superiores a $13,33 \text{ mg dm}^{-3}$, em Mehlich 3 superiores a $35,33 \text{ mg dm}^{-3}$, em H3A-2 modificado superiores a $22,57 \text{ mg kg}^{-1}$, Mehlich 1 superior a $74,88 \text{ mg kg}^{-1}$. O nível crítico determinado mediante regressão ficou muito próximo dos valores a partir dos que não foram constatadas respostas à adição de P para os extratores Olsen modificado e H3A-2 modificado, enquanto que para Mehlich 3 o valor a partir do qual não foram encontradas respostas foi superior ao NC do modelo de regressão.

Tanto para resina trocadora de íons, quanto para H3A-1 modificado, encontrou-se resposta à adição de P fertilizante em um solo com maior teor de P do que em outro solo que não apresentou resposta significativa ao P adicionado, isso dificulta aproximar um valor no qual poderia se estimar a existência ou ausência de resposta com esses extratores. São necessários, portanto, mais estudos com uma maior quantidade de solos e avaliações de P no solo com esses extratores para tentar aproximar um teor de P no solo acima do qual não existe resposta à adição do nutriente. Para o P total, como esperado, não foi possível estabelecer uma relação com a resposta da planta ao P acrescentado.

Nos Ultisols, foi encontrada diferença significativa entre os tratamentos com e sem adição de P para os solos 15, 16, 17, 18 e 19, e não significativa para os solos 20 e 21, destacando que nos solos em que foi encontrada resposta ao P, os teores determinados por todos os extratores foram muito baixos, para Bray 1 foram encontrados teores de P $< 2,76 \text{ mg kg}^{-1}$, para Mehlich 1 $< 2,76 \text{ mg kg}^{-1}$, para Mehlich 3 $< 5 \text{ mg dm}^{-3}$, para Olsen modificado $< 2,33 \text{ mg dm}^{-3}$, para resina $< 4,85 \text{ mg kg}^{-1}$, H3A1 modificado $< 9,61 \text{ mg kg}^{-1}$, e para H3A2 modificado $< 8,10 \text{ mg kg}^{-1}$. Os solos em que não foram obtidas diferenças significativas apresentaram teores de P no solo segundo Bray 1, Mehlich 1, Mehlich 3, Olsen modificado, resina, H3A1 modificado e H3A2 modificado $> 3,95 \text{ mg kg}^{-1}$, $24,98 \text{ mg kg}^{-1}$, 16 mg dm^{-3} , 13 mg dm^{-3} , $30,21 \text{ mg}$

kg⁻¹, 13,29 mg kg⁻¹ e 12,60 mg kg⁻¹ respectivamente, estes valores das faixas em que foi e não foi encontrada resposta à adição de P poderia ajudar junto com a informação da análise de correlação e regressão (apresentada anteriormente) a eleger o melhor extrator de P para os diferentes solos em estudo e para determinar os níveis críticos de P no solo.

Para o extrator Bray1, o teor a partir do qual não foram constatadas respostas à adição de P (3,95 mg P kg⁻¹ solo) contrasta com o nível crítico estabelecido por Sahrawat, Jones e Diatta (1997) para a cultura de arroz em um Ultisol da Costa do Marfim (superior a 12,5 mg P kg⁻¹ solo).

As quantidades de P total encontradas nos Ultisols foram muito menores do que outros tipos de solo avaliados, e foi possível estabelecer faixas de P total abaixo das quais houve resposta das plantas à adição de P e acima das quais não houve resposta, o que não ocorreu para os outros tipos de solo avaliados.

4.3 Correlações entre as metodologias de extração de P

Como apresentado na tabela 20, quando avaliados todos os solos (Andisols, Inceptisols e Ultisols), o P total não apresentou correlação significativa com nenhuma das metodologias de extração, isso ocorreu também para os Andisols e Inceptisols (tabelas 21 e 22) quando analisados os dados separadamente por ordem de solo. Por outro lado, para os Ultisols, foi encontrada correlação significativa ao nível de 10% entre algumas das metodologias e o P total (tabela 23).

Tabela 20 - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as diferentes metodologias de extração de fósforo para 21 (n=21) diferentes solos da Costa Rica

	P total	Bray 1	Mehlich 1	Mehlich 3	Olsen mod.	Resina	H3A-1 mod.	H3A-2 mod.
P total	1	0,16 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,10 ^{ns}
Bray 1		1	0,77***	0,81***	0,71***	0,74***	0,57***	0,62**
Mehlich 1			1	0,91***	0,70***	0,77***	0,61***	0,74***
Mehlich 3				1	0,88***	0,91***	0,80***	0,89***
Olsen mod.					1	0,97***	0,94***	0,94***
Resina						1	0,93***	0,95***
H3A-1							1	0,97***
H3A-2								1

^{ns}: não significativo, *: p<0,05, **: p<0,01, ***: p<0,001

Para as três ordens de solos da Costa Rica, a resina de troca iônica correlacionou-se, principalmente, com Olsen modificado, H3A-1 modificado, H3A-2 modificado e Mehlich 3. A resina de troca iônica também se correlacionou significativamente com o Mehlich 1 e Bray 1, mas com valores de coeficientes menores.

As duas metodologias que apresentaram coeficientes de correlação mais baixos com o P resina foram as mesmas que apresentaram menor correlação com o P acumulado pelas plantas para todos os solos (tabela 20 e tabela 9).

Bertsch et al. (2005), correlacionando uma grande quantidade de amostras de diferentes solos da Costa Rica analisadas por Mehlich 3 e Olsen modificado não conseguiram ajustar um modelo que pudesse estimar os teores de um extrator em função do outro, o que contrasta com Sotomayor-Ramírez et al. (2004) e com a boa correlação apresentada para esses extratores nos solos avaliados neste estudo (tabela 20).

Tchuenteu (1994) encontrou maiores correlações para o Olsen com Mehlich 1 e Bray 1 ($r = 0,88$ e $r = 0,96$ respectivamente), e para o extrator Bray 1 com Mehlich 1 ($r = 0,86$), trabalhando com solos das mesmas ordens deste estudo, com uma predominância dos solos mais intemperizados. Provavelmente isso ocasiona diferenças entre os resultados deste estudo, pois quando a análise de correlação foi aplicada só sobre os solos mais intemperizados, as correlações foram similares às apresentadas no estudo de Tchuenteu (1994) (tabela 23).

Dobermann et al. (1994), avaliando o teor de P em uma resina de caráter ácido (diferente à utilizada neste estudo), encontrou uma correlação positiva ($r = 0,60$) com o teor de P Olsen. Correlações similares ou ainda superiores foram encontradas para este estudo em uma condição geral e também por ordens de solo, os Andisols com a menor correlação, mas ainda assim significativa ao nível de 10% (tabelas 20, 21, 22 e 23).

Leal, Sumner e West (1994), utilizando uma resina em lâmina encontraram boa correlação com o P Bray 1 ($r = 0,84$). Neste estudo, utilizando resina em esferas e carregada com bicarbonato de sódio, também foi encontrada correlação significativa entre ambas as metodologias ($r = 0,74$) em todas as ordens de solo.

Cajuste et al. (1994), trabalhando com o fracionamento de Hedley, encontraram uma alta correlação entre o P Bray 1, P Olsen e P Mehlich 1 com as frações mais lábeis do P no solo extraídas por resina e bicarbonato de sódio, o que

poderia estar relacionado com a significância da correlação entre esses extratores apresentada neste estudo, já que extraem em grande parte das mesmas frações.

Tabela 21 - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre metodologias de extração de fósforo em 7 (n=7) Andisols de Costa Rica

	P							
	total solo	Bray 1	Mehlich 1	Mehlich 3	Olsen mod.	Resina	H3A-1 mod.	H3A-2 mod.
P total solo	1,00	0,12 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,41 ^{ns}	-0,21 ^{ns}
Bray 1		1,00	0,89**	0,96***	0,737°	0,77*	0,71°	0,63 ^{ns}
Mehlich 1			1,00	0,93**	0,57 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,24 ^{ns}
Mehlich 3				1,00	0,75°	0,69°	0,62 ^{ns}	0,52 ^{ns}
Olsen mod.					1,00	0,68°	0,69°	0,73°
Resina						1,00	0,88**	0,90**
H3A-1 mod.							1,00	0,95**
H3A-2 mod.								1,00

^{ns}: não significativo, *: p<0,05, **: p<0,01, ***: p<0,001

Para o H3A-1 e H3A-2 modificados foram encontrados altos coeficientes de correlação com a resina de troca iônica, Olsen modificado, seguido pelo Mehlich 3, e menor correlação com o Mehlich 1 e Bray 1. Haney et al. (2006, 2010) também encontraram alta correlação dos extratores “H3A” com Mehlich 3 e Olsen, corroborando com o encontrado neste estudo. Haney et al. (2010) também apresentam menor correlação dessas metodologias com o método Bray 1, e a superioridade na correlação do H3A-2 com as outras metodologias em relação à metodologia inicial (H3A-1). A similaridade entre os resultados de Haney et al. (2006, 2010) com os encontrados neste trabalho, indicam que a modificação de utilizar citrato de sódio em vez do citrato de lítio parece não acarretar em grandes mudanças no comportamento do extrator.

Por outro lado, concordando com os resultados de Nuernberg; Leal e Sumner (1998), a correlação do método da resina com os outros extratores foi menor em solos com maior influencia vulcânica. Tanto no estudo mencionado, quanto neste trabalho, para os Andisols, a maior correlação do método da resina apresentou-se com o Bray 1 (tabela 21), enquanto que para as outras ordens de solos avaliados o coeficiente de correlação foi maior para com as outras metodologias (tabelas 22 e 23). Outra similaridade com o estudo de Nuernberg; Leal e Sumner (1998), foi a baixa ou falta de correlação do extrator Mehlich 1 em relação às outras metodologias em solos vulcânicos pouco intemperizados, o que os autores relacionam com solubilização de apatita pelo ataque ácido do Mehlich 1.

Tabela 22 - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre metodologias de extração de fósforo em 7 (n=7) Inceptisols de Costa Rica

	P							
	total	Bray	Mehlich	Mehlich	Olsen		H3A-1	H3A-2
	solo	1	1	3	mod.	Resina	mod.	mod.
P total solo	1,00	-0,13 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,15 ^{ns}
Bray 1		1,00	0,62 ^{ns}	0,84*	0,85*	0,84*	0,84*	0,84*
Mehlich 1			1,00	0,86*	0,66 ^{ns}	0,73°	0,69°	0,82*
Mehlich 3				1,00	0,88**	0,89**	0,89**	0,95**
Olsen modificado					1,00	0,99***	0,99***	0,97***
Resina						1,00	0,99***	0,98***
H3A-1 modificado							1,00	0,98***
H3A-2 modificado								1,00

^{ns}: não significativo, *: p<0,05, **: p<0,01, ***: p<0,001

Tabela 23 - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre metodologias de extração de fósforo em 7 (n=7) Ultisols de Costa Rica

	P							
	total	Bray	Mehlich	Mehlich	Olsen		H3A-1	H3A-2
	solo	1	1	3	mod.	Resina	mod.	mod.
P total solo	1,00	0,61 ^{ns}	0,75°	0,72°	0,75°	0,74°	0,62 ^{ns}	0,60 ^{ns}
Bray 1		1,00	0,95**	0,97***	0,95**	0,96***	0,97***	0,97***
Mehlich 1			1,00	0,99***	0,99***	0,99***	0,89**	0,91**
Mehlich 3				1,00	0,99***	0,99***	0,94**	0,95***
Olsen modificado					1,00	0,99***	0,89**	0,91**
Resina						1,00	0,92**	0,93**
H3A-1 modificado							1,00	0,99***
H3A-2 modificado								1,00

^{ns}: não significativo, *: p<0,05, **: p<0,01, ***: p<0,001

5 CONCLUSÕES

Os teores de Ca e Mg determinados pelas metodologias KCl 1 mol L⁻¹ e resina de troca iônica apresentam alta correlação entre si e as quantidades destes elementos poderiam ser estimados pelo modelo de regressão de uma metodologia para outra.

Os modelos de regressão para a estimação dos teores de Ca e Mg entre a solução KCl 1 mol L⁻¹ e a resina diferem dos modelos encontrados por Raij (1986) para os solos do Brasil.

Os teores de K determinados pela solução Olsen modificada correlacionaram satisfatoriamente com os teores de K determinados pelo método da resina e podem ser estimados a partir do modelo de regressão.

O P determinado pelo método da resina, Mehlich 1 e Mehlich 3 tem relação com os teores de Ca e Mg no solo.

O pH é uma variável que não correlaciona com os resultados da maioria das metodologias de extração de P, possivelmente porque o próprio pH dessas metodologias é muito diferente ao pH do solo. Para o teor de C no solo também não foi encontrada correlação.

O Al trocável correlacionou-se com todos os extratores, principalmente com o método da resina.

As causas da falta de correlação entre o Al trocável e os teores de P no solo “Palmares” não foram esclarecidas neste estudo, portanto poderiam ser objeto de estudo em trabalhos futuros.

Em uma condição com as três ordens de solo avaliados os extratores Olsen modificado e resina de troca iônica foram os que melhor representaram as respostas das plantas.

Quando avaliados os extratores para cada ordem de solo, o método da resina parece não ser um método adequado para a determinação do P nos Inceptisols. Para essa ordem de solo o extrator Olsen parece ser mais adequado.

O relativamente novo extrator H3A-2 (modificado) também apresentou bons resultados para a avaliação do P disponível em Inceptisols, mas para seu uso é recomendável realizar mais trabalhos de calibração para corroborar sua viabilidade de uso.

REFERÊNCIAS

ABDÚ, N. Soil phosphorus extraction methodologies: A review. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 1, n. 5, p. 159-161, 2006.

ABOU NOHRA, J.; MADRAMOOTOO, J.; HENDERSHOT, W. Modelling phosphate adsorption to the soil: Application of the non-ideal competitive adsorption model. **Environmental Pollution**, London, v. 149, p. 1-9, 2007.

ALVARADO, A.; BUOL, S. Field estimation of phosphorus retention by Andepts. **The Journal Series of the North Carolina Research Service**, Raleigh, N.C. 27695-7619. 19__?. (Paper n. 9440)

ALVARADO, A.; ITURRIAGA, I.; SMYTH, J.; PORTUGUEZ, E.; UREÑA, J. Efecto residual del fertilizante fosfatado adicionado al cultivo de la papa en un Andisol de Juan Viñas, Costa Rica. **Agronomía Costarricense**, San José, v. 33, n. 1, p. 63-76, 2009.

AMER, F.; BOULDING, C.; BLACK, C.; DUKE, F. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and P32 equilibrium. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 151, p. 143-146, 1955.

ARIAS, F.; SEGURA, R.; SERRANO, E.; BERTSCH, F.; LÓPEZ, A.; SOTO, E. Niveles críticos de calcio, magnesio, potasio y fósforo en suelos dedicados al cultivo del banano (*Musa AAA*) en Costa Rica. **CORBANA**, Guácimo, v.29, n.56, p.69-81, 2003.

BALDWIN, D.; HOWITT, J.; BEATTIE, J. Abiotic degradation of organic phosphorus compounds in the environment. In:TURNER, B.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D.(Ed.). **Organic Phosphorus in the Environment**. London:CABI Publishing, 2005. 399p.

BECK, M.; ROBARGE, W.; BUOL, S. Phosphorus retention and release of anions and organic carbon by two Andisols. **European Journal of Soil Science**, London, v. 50, p. 157-164, 1999.

BERTSCH, F. **La fertilidad de los suelos y su manejo**. San José: ACCS, 1995. 157p.

BERTSCH, F.; ALVARADO, A.; HENRÍQUEZ, C.; MATA, R. Properties, geographic distribution, and management of major soil orders of Costa Rica. In: **Quantifying Sustainable Development. The Future of Tropical Economies**. Academic Press. 2000. chap. 10, p. 265-294.

BERTSCH, F.; BEJARANO, J.; CORRALES, M. Correlación entre las soluciones extractoras KCl-Olsen modificado y Mehlich 3, usadas en los laboratorios de suelos de Costa Rica. **Agronomía Costarricense**, San José, v.29, n.3, p.137-142, 2005.

BLASCO, M. Suelos agrícolas volcánicos de América Central. **Anuario de Estudios Centroamericanos**, San José, v. 2, p. 393-401, 1976.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; WELTER, S.; ALMEIDA, R.; GIASSEN, E. Simultaneous extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soils and potassium recommendations for crops in southern Brazil. **Pedosphere**, Nanjing, v. 21, n.3, p. 365-372, 2011.

BORTOLON, L.; SCHLINDWEIN, J.; GIANELLO, C. Métodos de extração de fósforo e potássio no solo sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n.8, p. 2400-2407, 2009.

BOWATTE, S.; TILLMAN, R.; CARRAN, A.; GILLINGHAM, A.; SCOTTER, D. In situ ion exchange resin membrane (IEM) technique to measure soil mineral nitrogen dynamics in grazed pastures. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 44, p. 805–813, 2008

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

BRASIL, E.; MURAOKA, T. Extratores de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p. 599-606, 1997.

BRAY, R.; KURTZ, L. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. **Soil Science**, Baltimore, v.59, p. 39-45, 1945.

BUURMAN, P.; PETERSE, F.; ALMENDROS-MARTIN, G. Soil Organic matter chemistry in allophonic soils: A pyrolysis-GC/MS study of a Costa Rican Andosol catena. **European Journal of Soil Science**, London, v.58, p.1330-1347, 2007.

CABALCETA, G. **Niveles críticos de fósforo, azufre y correlación de soluciones extractoras en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica.** 1993. 167p. Tesis (Maestría en Recursos Naturales, Área de Concentración Suelos Y Nutrición de Plantas) - Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 1993.

CABALCETA, G.; CORDERO, A. Niveles críticos de fósforo en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. **Agronomía Costarricense**, San José, v.18, n.2, p.147-161,1994.

CABALCETA, G.; MOLINA, E. Niveles críticos de nutrimentos en suelos de Costa Rica utilizando la solución extractora Mehlich 3. **Agronomía Costarricense**, San José, v. 30, n. 2, p. 31-44, 2006.

CAJUSTE, L.; LAIRD, R.; CRUZ, J.; CAJUSTE JR, L. Phosphate availability in tropical soils as related to phosphorus fractions and chemical tests. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.25, n.9/10, p.1881-1889, 1994.

CANTARUTTI, R.; BARROS, N.; PRIETO, H.; NOVAIS, R. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap.13, p. 769-850.

CATANI, R.; NAKAMURA, P. Extração do fósforo nativo e do adicionado ao solo com várias soluções. **Anais da E. S. A. "Luiz de Queiroz"**, Piracicaba, v.28, p. 297-312, 1971.

CELI, L.; BARBERIS, E. Abiotic stabilization of organic phosphorus in the environment. In: TURNER, B.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. **Organic Phosphorus in the Environment**. London: CABI Publishing,2005. chap. 6, p. 113-132.

CHEESMAN, A.; TURNER, B.; REDDY, K. Interaction of phosphorus compounds with Anion-Exchange Membranes: Implications for soil analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, p. 1607–1612, 2010.

CORDERO, A.; MINER, G. A calibration program for corn and rice fertilization and soil test data in Costa Rica. In: BORNEMISZA, E.; ALVARADO, A. (Ed.). **Soil management in tropical America**, Raleigh, 1975. chap. 29. p. 533-548.

CORRÊA, L.; HAAG, H. Disponibilidade de fósforo pelos extratores de Mehlich 1 e resina em latossolo vermelho amarelo, álico cultivado com três gramíneas forrageiras. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 50, n. 2, p. 287-294, 1993.

DELGADO, A.; TORRENT, J. Phosphate rich soils in the European Union: estimating total plant available phosphorus. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.6, p.205-214, 1997.

DÍAZ-ROMEY, R.; HUNTER, A. **Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero**. Turrialba, Costa Rica: CATIE, 1978. 71p.

DOBERMANN, A.; LANGNER, H.; MUTSCHER, H.; YANG, J.; SKOGLEY, E.; ADVIENTO, M.; PAMPOLINO, M. Nutrient adsorption kinetics of ion exchange resin capsules: A study with soils of international origin. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 9/10, p. 1329-1353, 1994.

DONG, D.; PENG, X.; YAN, X. Organic acid exudation induced by phosphorus deficiency and/or aluminum toxicity in two contrasting soybean genotypes. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 122, p. 190-199, 2004.

ESCUDEY, M.; GALINDO, G.; FÖRSTER, J.; BRICEÑO, M.; DIAZ, P.; CHANG, A. Chemical forms of phosphorus of volcanic ash-derived soils in Chile. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.35, n.5/6, p. 601-616, 2001.

FAGERIA, N.; SANTOS, A.; BALIGAR, V. Phosphorus soil test calibration for lowland rice on an Inceptisol. **Agronomy Journal**, Madison, v.89, n.5, p.737-742, 1997.

FAGERIA, N. Resposta de arroz de terras altas, feijão, milho e soja à saturação por base em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.3, p.416-424, 2001.

FERNANDES, M.; COUTINHO, J. Anion and cation exchange resin membranes to assess the phosphorus status of some Portuguese soils. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.28, n.6/8, p.483-395, 1997.

GRANDE, M.; CURI, N.; QUAGGIO, J. Disponibilidade de fósforo pelos extratores de Mehlich e resina, em solos cultivados com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, p. 45-50, 1986.

HANEY, R.; HANEY, E.; HOSSNER, L.; ARNOLD, J. Development of a new soil extractant for simultaneous phosphorus, ammonium, and nitrate analysis. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 37, p. 1511-1523, 2006.

HANEY, R.; HANEY, E.; HOSSNER, L.; ARNOLD, J. Modifications to the new soil extractant H3A-1: A multinutrient extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 41, p. 1513-1523, 2010.

HAYNES, R.; MOKOLOBATE, M. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by addition of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht v. 59, p. 47-63, 2001.

HAVLIN, J.; BEATON, J.; TISDALE, S.; NELSON, W. **Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management**. 7th ed. New Jersey: Ed. Prentice Hall, 2007. 515p.

HENRÍQUEZ, C.; BERTSCH, F.; SALAS, R. **Fertilidad de suelos, manual de laboratorio**. San José: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 1995. 64p.

HENRÍQUEZ, C.; BRICEÑO-SALAZAR, J.; MOLINA, E. 1992. Fraccionamiento de fósforo orgánico en cuatro órdenes de suelo de Costa Rica. **Agronomía Costarricense**, San José, v.16, n.2, p. 31-38, 1992.

HOFFLAND, E.; WEI, C.; WISSUWA, M. Organic anion exudation by lowland rice (*Oryza sativa* L.) at zinc and phosphorus deficiency. **Plant and Soil**, The Hague, v. 283, p. 155-162, 2006.

HOLANDA, J. de; BRASIL, E.; SALVIANO, A.; CARVALHO, M.; RODRIGUES, M.; MALAVOLTA, E. Eficiência de extratores de fósforo para um solo adubado com fosfatos e cultivado com arroz. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.52, n.3, p. 561-568, 1995.

HORTA, M.; TORRENT, J. The Olsen P method as an agronomic and environmental test for predicting phosphate release from acid soils. **Nutrient Cycling Agroecosystems**, Dordrecht v.77, p. 283-292, 2007.

JARREL, W.; BEVERLY, R. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.34, p.197-224, 1981.

KARTIKA, J.; SUSILA, A. Phosphorus correlation study for vegetables grown in the Ultisol-Nangung, Bogor, Indonesia:SANREM-TMPEGS, 2007.(Working paper, 07-08.)

LEAL, J.; SUMNER, E.; WEST, L. Evaluation of available P with different extractants on Guatemalan soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 9/10, p. 1161-1196, 1994.

LINQUIST, B.; RUARK, M. Re-evaluating diagnostic phosphorus tests for rice systems based on soil phosphorus fractions and field level budgets. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, n. 2, p. 501-508, 2011.

MALLARINO, A. Comparison of Mehlich-3, Olsen and Bray-P1 procedures for phosphorus in calcareous soils. NORTH CENTRAL EXTENSION-INDUSTRY SOIL FERTILITY CONFERENCE, 25, 1995., St Louis MO. **Proceedings of the Twenty-fifth North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference**, Manhatam: Potash Phosphate Institute, 1995, p.96-101.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 889p.

MARTINI, J. The evolution of soil properties as it releases to the genesis of volcanic soil ash in Costa Rica. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v.40, n.6, p.895-900,1976.

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.

MENDEZ, J.; BERTSCH, F. Contenido total y disponibilidad de nutrimentos en dos muestras de cenizas expulsadas en enero de 2010 por el volcán Turrialba, Costa Rica. **Agronomía Costarricense**, San José, v.35, n.2, p.97-104, 2011.

MOLINA, E.; RODRÍGUEZ, J. Fertilización con N, P, K y S, y curvas de absorción de nutrimentos en arroz var. CFX-18 en Guanacaste. **Agronomía Costarricense**, San José, v.36, n.1, p.39-51, 2012.

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

MYLAVARAPU, R.; SANCHEZ, J.; NGUYEN, J.; BARTOS, J. Evaluation of Mehlich-1 and Mehlich-3 extraction procedures for plant nutrients in acid mineral soils of Florida. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 33, n. 5/6, p. 807-820, 2002.

NEGRIN, M.; GONZÁLEZ, S.; HERNÁNDEZ, M. P fractionation in sodium bicarbonate extracts of andic soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 27, n. 6, p.761-766, 1995.

NELSON, W.; MEHLICH, A.; WINTER, E. The development and use of soil tests for phosphorus availability. In: PIERRE, W.H. ; NORMAN, A.G.(Ed.). **Soil and fertilizer phosphorus**. Madison, Wisc: Am. Soc. of Agron., 1953. Agronomy, v.4, p. 153-138.

NOVAIS, R.; SMYTH, J. Extratores. In:_____ **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa MG: UFV, DPS, 1999. cap. 8, p. 183-212.

NOVAIS, R.; SMYTH, J.; NUNES, F. Fósforo. In:_____ **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap.7, p. 471-550.

NUERNBERG, N.; LEAL, J.; SUMNER, M. Evaluation of an anion-exchange membrane for extracting plant available phosphorus in soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.29, n.3/4, p. 467-479, 1998.

OBERSON, A.; JONER, E. Microbial turnover of phosphorus in soil. In: TURNER, B.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. Ed.). **Organic Phosphorus in the Environment**. London :CABI Publishing, 2005. 399p.

OBURGER, E.; KIRK, G.; WENZEL, W.; PUSCHENREITER, M.; JONES, D. Interactive effects of organic acids in the rhizosphere. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.41, p. 449-457, 2009.

OBURGER, E.; JONES, D.; WENZEL, W. Phosphorus saturation and pH differentially regulate the efficiency of organic acid anion-mediated P solubilization mechanisms in soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.341, p. 363-382, 2011.

OEHL, F.; OBERSON, A.; SINAJ, S.; FROSSARD, E. Organic phosphorus mineralization studies using isotopic dilution techniques. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 65, p. 780-787, 2001.

OLSEN, S.; COLE, C.; WATANABE, F.; DEAN, L. **Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate**. 1954. (USDA, circ. 939.)

PALMA, G.; FASSBENDER, H. Estudio del fósforo en suelos de América Central. V. Uso de resinas de intercambio para evaluar la disponibilidad de P. **Turrialba**, Turrialba, v. 20, n.3, p. 279-287.

PÉREZ, J.; BORNEMISZA, E. Suelos contaminados con Cu en el Pacífico Sur de Costa Rica. II. Efecto del fosfato en invernadero. **Agronomía Costarricense**, San José, v.10, n.1/2, p.173-177, 1986.

PLAXTON, W.; TRAN, H. Metabolic adaptations of phosphate-starved plants. **Plant Physiology**, Waterbury, v.156, p. 1006-1015, 2011.

POILE, G.; RING, S.; CONYERS, M. The influence of centrifuging on phosphorus (Olsen P) soil test values. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 28, p. 559-562, 1990.

QIAN, P.; SCHOENAU, J. Practical application of ion exchange resins in agricultural and environmental soil research. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 82, p. 9-21, 2001.

QIAN, P.; SCHOENAU, J. Use of ion-exchange membrane to assess nitrogen-supply power of soils. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v.28, p. 2193-2200, 2005.

QIAN, P.; SCHOENAU, J. Using an anion exchange membrane to predict soil available N and S supplies and the impact of N and S fertilization on canola and wheat growth. **Pedosphere**, Nanjing, v. 17, n. 1, p. 77-83. 2007.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and Environment for Statistical Computing** 2.13.0. Vienna, Austria, 2011.

RAGHOTHAMA, K. Phosphate acquisition. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 665-693, 1999.

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, 1978.

RAIJ, B. van. Bioavailable tests: Alternatives to standard soil extractions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York v.29, n.11-14, p.1553-1570. 1998.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. IAC. 284 p. 2001.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.; FURLANI, A. **Boletim técnico 100. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2 ed. Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 285p.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.; SILVA, N. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 17, n. 5, p. 547-556, 1986.

RAIJ, B. van; TEXEIRA, C. Comparação de quatro extratores de fósforo de solos. **Bragantia**, Campinas v. 43, n. 1, p. 17-29, 1984.

RICHARDSON, A.; GEORGE, T.; HENS, M.; SIMPSON, R. Utilization of soil organic phosphorus by higher plants. In: TURNER, B.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. (Ed.). **Organic Phosphorus in the Environment**. London: CABI Publishing, 2005. chap. 8, p. 165-184.

SAGGAR, S.; HEDLEY, M.; WHITE, R.; PERROT, K.; GREGG, P.; CORNFORTH, I.; SINCLAIR, A. Development and evaluation of an improved soil test for phosphorus, 3: field comparison of Olsen, Colwell and Resin soil P tests for New Zealand pasture soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 55, p. 35-50, 1999.

SANTOS, E.; KLIEMANN, H. Disponibilidade de fósforo de fosfatos naturais em solos de cerrado e sua avaliação por extratores químicos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 35, n.3, p. 139-146, 2005.

SAHRAWAT, K. Direct and residual phosphorus effects on grain yield-phosphorus uptake relationships in upland rice on an Ultisol in West Africa. **International Journal of Plant Production**, Gorgan, v.2, n.4, p.281-287, 2008.

SAHRAWAT, K.; JONES, M.; DIATTA, S. Extractable phosphorus and rice yield in an Ultisol of the Humid forest zone in West Africa. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.28, n.9/10, p.711-716, 1997.

SATO, S.; COMMEFORD, N. Influence of soil pH on inorganic phosphorus sorption and desorption in a humid Brazilian Ultisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 685-694, 2005.

SCHACHTMAN, D.; REID, R.; AYLING, S. Phosphorus uptake by plants: From soil to cell. **Plant Physiology**, Waterbury, v. 116, p. 447-453, 1998.

SCHLINDWEIN, J.; GIANELLO, C. Nível de suficiência e índice de equivalência entre o fósforo determinado pelos métodos da resina de troca iônica e Mehlich 1. **Revista Brasileira De Agrociência**, Pelotas, v. 14, n. 2, p. 299-306, 2008.

SCHLINDWEIN, J.; GIANELLO, C. Fósforo disponível determinado por lâmina de resina enterrada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 77-84, 2009.

SHARPLEY, A.; DANIEL, T.; SIMS, T.; LEMUNYON, J.; STEVENS, R.; PARRY, R. **Agricultural phosphorus and eutrophication**. 2nd ed. USDA-ARS, 2003. 38p.

SHERROD, S.; BELNAP, J.; MILLER, M. Comparison of ion-exchange resin counterions in the nutrient measurement of calcareous soils: Implications for correlative studies of plant-soil relationships. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, n. 13/14, p. 1981-2001, 2003.

SIBBESEN, E. A simple ion exchange procedure for extracting plant-available elements from soil. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 46, p. 665-669, 1977.

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

SILVA, L.; RANNO, S.; RHODEN, A.; SANTOS, D.; GRAUPE, F. Avaliação de métodos para estimativa da disponibilidade de fósforo para arroz em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 207-216, 2008.

SIMS, J. Soil test phosphorus. In: OLSEN, P.;PIERZYNSKI, G. **Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters**. North Carolina: USDA-CSREES, 2000. p. 20-21.

SINCLAIR, A.; JOHNSTONE, P.; SMITH, L. Relationship between pasture dry matter dry matter ield and soil Olsen P from a series of long-term field trials. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Wellington, v. 40, p. 559-567, 1997.

SMITH, F.; MUDGE, S.; RAE, A.; GLASSOP, D. Phosphate transport in plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 248, p. 71-83, 2003.

SOBRAL, L. **Comparison of resin, Mehlich 1 and Mehlich 3 extractants for phosphorus, in coastal tableland soils**, 2009. EMBRAPA (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 44)

SOTOMAYOR-RAMÍREZ, D.; MARTÍNEZ, G.; MYLAVARAPU, R.; SANTANA, O.; GUZMÁN, J. Phosphorus soil tests for environmental assessment in subtropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.35, n.11/12, p.1485-1503, 2004.

SOUSA, J.; COUTINHO, J. Effect of the extraction period on the routine assessment of soil P status by ion-exchange resin membranes. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 40, p. 1995–2008, 2009.

SOUZA JUNIOR, R.; OLIVEIRA, F.; SANTOS, H.; FREIRE, F.; ARRUDA, J. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 159-169, 2012.

TCHUENTEU, F. Prediction of the availability of phosphorus in acid soils of Cameroon using five chemical extractants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 25, n. 9/10, p. 1537-1551, 1994.

TIANG-RONG, G.; PENG-CHENG, Y.; ZI-DONG, Z.; JIANG-JIA, W.; MEI, W. Involvement of antioxidative defense system in rice seedlings exposed to aluminum toxicity and phosphorus deficiency. **Rice Science**, Beijing, v. 19, n.3, p. 207-212, 2012.

TICCONI, C.; ABEL, S. Short on phosphate: plant surveillance and countermeasures. **TRENDS in Plant Science**, Oxford, v.9, n.11, p.548-555, 2004.

UUSITALO, R.; EKHOLM, P. Phosphorus in runoff assessed by anion exchange resin extraction and algal assay. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 32, p. 633-641, 2003.

VANCE, C.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, Oak Ridge, v. 157, p. 423-447, 2003.

VITOUSEK, P.; DENSLOW, J. Differences in extractable phosphorus among soils of the La Selva Biological Station, Costa Rica. **Biotropica**, Gainesville, v.19, n.2, p.167-170, 1987.

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

WATSON, M.; MULLEN, R. **Understanding soil test for Plant-available phosphorus**. Columbus: The Ohio State University, Extension, 2007. 4 p. Fact Sheet, Ohio.

YANG, X.; POST, W. Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: A synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. **Biogeosciences**, Munich, v.8, p. 2907-2916, 2011.

ZHANG, F.; MA, J.; CAO, Y. Phosphorus deficiency enhances root exudation of low molecular weight organic acids and utilization of sparingly soluble inorganic phosphates by radish (*Raphanus sativus*) and rape (*Brassica napus* L.) plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.196, p. 261-264, 1997.

ZHANG, Q.; WANG, C.; TIAN, J.; LI, K.; SHOU, H. Identification of rice purple acid phosphatases related to phosphate starvation signaling. **Plant Biology**, Freiburg, v. 13, p. 7-15, 2011.

ZHENG, Z.; ZHANG, T. Soil phosphorus tests and transformation analysis to quantify plant availability: A review. In: WHALEN, J. **Soil fertility improvement and integrated nutrient management – A global perspective**. INTECH, 2011. chap. 2, p.19-36.