

RESINA DE INTERCAMBIO IONICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE FOSFORO EN EL SUELO

B. van Raij, H. Cantarella, J.A Quaggio y L.I. Prochnow*

El fósforo (P) ha recibido considerable atención dentro de la investigación sobre métodos de análisis de suelos, a pesar de esto, todavía no se llega a un acuerdo sobre cual sería la mejor metodología para determinar la disponibilidad de este nutriente. La utilización de la resina de intercambio parece ser un excelente procedimiento, sin embargo, se lo ha aceptado en forma limitada como método de análisis de rutina en los laboratorios de suelos alrededor del mundo.

Cuando existen varios métodos que reportan contenidos diferentes de P en las mismas muestras de suelo es necesario determinar que procedimiento es el mejor. Para lograr esto se conducen experimentos de invernadero que permiten establecer que método correlaciona más estrechamente el contenido de P en el suelo con la absorción de P por la planta. Estos experimentos, conducidos en macetas, utilizan suelos que tengan un amplio rango de las características que afectan las reacciones de P. Las macetas se siembran con una planta indicadora a la cual se suministran todos los nutrientes con excepción de P. El grado de correlación entre la cantidad de P absorbido por la planta indicadora y el contenido de P en el suelo determinado por cada método permite decidir que procedimiento predice mejor la disponibilidad de P en el suelo.

Un ejemplo de esta investigación conducida con arroz de inundación se presenta en la **Figura 1**. En este caso la extracción de P con resina se compara con la extracción de P con Mehlich 1. Los resultados indican que el P extraído con la resina correlaciona mucho mejor con el P absorbido por el arroz que el P extraído utilizando el método Mehlich 1.

Se han conducido numerosos estudios comparando métodos de determinación de P en el suelo. La revisión de literatura hecha por Silva y Raij (1999) incluye trabajos publicados con suelos de diferentes países en los cuales se correlaciona el contenido de P determinado por diferentes métodos con la absorción de P por la planta. Los datos en la **Tabla 1** indican que el método que utiliza la resina de intercambio iónico se correlaciona mejor con la absorción de P que los otros métodos. Se observó también que este método es apropiado tanto para suelos ácidos como para alcalinos.

Como se observa en la **Tabla 2**, el pH de la solución es importante en el procedimiento que utiliza la resina de intercambio iónico. La extracción de P no fue adecuada cuando el pH de la suspensión fue bajo. En el suelo 2, que no presentó respuesta a la adición de P, se obtuvo un alto valor de P extraíble, 36 mg (dm³)⁻¹ cuando el pH de la suspensión fue de 6.8, mientras que a un pH de 5.6 la determinación solamente reportó 5 mg (dm³)⁻¹. La mayor disponibilidad del P de los fosfatos de Fe y Al cuando aumenta el pH puede explicar este comportamiento. Esta es también la razón por la cual los extractantes ácidos no remueven P de los suelos con alto contenido de óxidos de Fe y Al que sin embargo tienen suficiente P disponible. Es importante la saturación de la resina de intercambio con el ion bicarbonato porque con esto se amortigua el medio, factor que favorece la estabilidad de los resultados.

La ecuación que se presenta a continuación muestra la dinámica de las formas del P que un método de análisis de suelo debe reflejar. El método que represente estas condiciones debe captar el P que está presente en la solución del suelo en condiciones de campo (cantidades

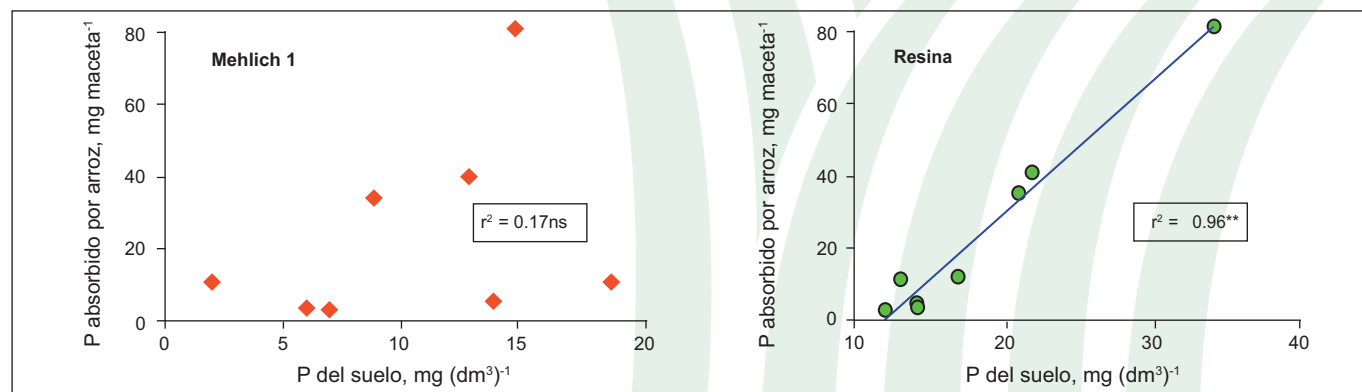


Figura 1. Relación entre la absorción de P por plantas de arroz de inundación y el P determinado por los procedimientos de resina y Mehlich 1 (Grande et al., 1986).

* Tomado de: van Raij, B., H. Cantarella, J.A. Quaggio and L. Prochnow. 2009. Ion Exchange resin for assessing phosphorus availability in soils. Better Crops 93(1):23-25.

Tabla 1. Efectividad de métodos de extracción de P del suelo para predecir la absorción de P por la planta (Silva y Raij, 1999).

Métodos	Promedio del coeficiente de determinación (100 r ²) para suelos		
	Suelos ácidos	Suelos alcalinos o neutros	Suelos no especificados
Resina	84	83	69
Olsen	47	52	58
Mehlich 1	56	39	41
Bray 1	53	25	48
Morgan	26	40	32

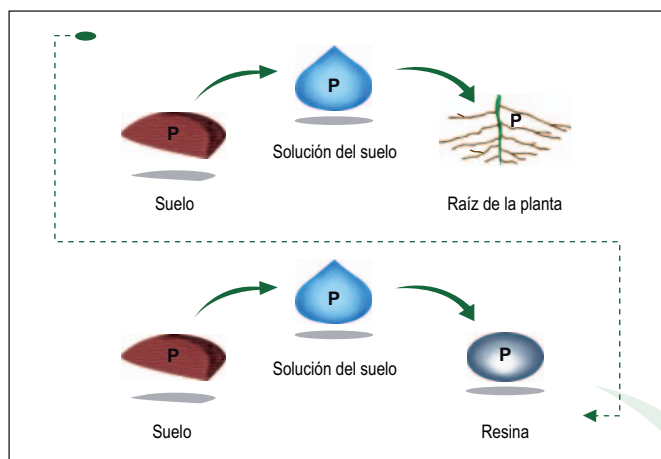
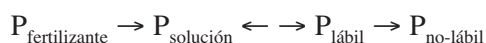


Figura 2. Demostración esquemática del P extraído desde el suelo por la resina de intercambio de iones.

muy bajas) y extraer el P presente en las formas lábiles (disponibles a través del tiempo) del suelo. Sin embargo, no debe extraer el P que no es lábil (fijado y precipitado en formas muy insolubles) y el P que se encuentra en los fertilizantes aplicados que no se han disuelto. La extracción de P con la resina de intercambio iónico se realiza en una suspensión de agua y esta condición simula mejor que otros métodos la dinámica de absorción de P por las raíces de las plantas.

La resina actúa como un sitio de atracción de los iones que se encuentran en el agua de la suspensión. Los iones fosfato cargados negativamente (principalmente H₂PO₄⁻) son atraídos por las cargas positivas de la resina de intercambio iónico, promoviendo de esta forma la disolución de P lábil de la fase sólida del suelo.



La **Figura 2** muestra en forma esquemática el modo de acción de la resina en comparación con la normal absorción del P por las plantas. Las raíces de las plantas absorben P de la solución del suelo. El movimiento del P a través de la solución del suelo hacia las raíces crea una gradiente de concentración que promueve la disolución del P lábil de la fase sólida y el flujo continuo de P hacia las raíces por difusión. De igual forma, con el

método de la resina, el poco P que está inicialmente presente en la solución es atraído por un material poroso sintético con cargas positivas (resina) simulando la acción de las raíces. Esta condición crea la gradiente de concentración que extrae el P de las formas lábiles. En el laboratorio, el proceso se acelera mediante 16 horas continuas de agitación de la suspensión suelo - resina.

Un análisis de laboratorio debe extraer el P de la solución y el P lábil del suelo, pero no debe remover los fosfatos de lenta liberación si éstos no contribuyen con P que la planta pueda absorber. El método tampoco debe extraer P de las formas no-lábiles. En la práctica, el problema de la mayoría de extractantes para P es que éstos determinan formas químicas específicas de P y no necesariamente el P biodisponible. Los extractantes ácidos, como Mehlich 1, disuelven preferentemente los fosfatos de calcio y los extractantes que contienen fluoruro, como Bray 1, actúan específicamente sobre los fosfatos de aluminio.

En la **Tabla 3** se presentan varios aspectos que ilustran la relación entre diferentes fuentes de P con los métodos de determinación de este nutriente en el suelo. Los suelos utilizados fueron tratados con superfosfato triple, roca fosfórica y fosfato de aluminio calcinado. Se estableció un experimento en macetas y se utilizó soya como planta indicadora. Un tratamiento recibió superfosfato triple al momento de la siembra y en los otros tratamientos se aplicaron las tres fuentes de P 75 días antes de la siembra. Se determinó la absorción de P por la soya y se analizaron las muestras de suelo utilizando los métodos de la resina, Mehlich 1 y Bray 1.

Al comparar los resultados de la aplicación de superfosfato triple a la siembra con la aplicación de este mismo material 75 días antes se puede ver que la disponibilidad de P se reduce con el tiempo de incubación, hecho que se demuestra por la reducción de la absorción de P por la soya que pasa de 4.3 a 2.3 mg maceta⁻¹ (**Tabla 3**). Esta reducción en la disponibilidad del P proveniente de los fosfatos solubles en agua es un efecto muy conocido. El método de la resina identifica esta tendencia, mientras que los métodos Mehlich 1 o Bray 1 no lo hacen.

La roca fosfórica Alvorada tiene una baja eficiencia agronómica lo que se refleja en la baja absorción de P por la planta indicadora (1.1 mg de P maceta⁻¹). Los resultados de la determinación de P con los métodos de la resina y Bray 1 indican esta tendencia, pero Mehlich 1 extrae demasiado P, conducta esperada para un extractante ácido actuando sobre el suelo tratado con apatita.

Cuando se aplicó fosfato de aluminio calcinado, también un material de baja eficiencia agronómica, los valores de P extraídos con la resina y Mehlich 1 fueron bajos, pero con el método Bray 1 se sobreestimó el

Tabla 2. Efectos del pre-tratamiento¹ de la resina en el pH de la suspensión resina - suelo y en el P extraíble (Raij et al., 1986).

Saturación de la resina	----- Suelo 1-----		----- Suelo 2 -----	
	pH de la suspensión	P extraído, mg (dm ³) ⁻¹	pH de la suspensión	P extraído, mg (dm ³) ⁻¹
Resina-NaCl	5.3	1	5.6	5
Resina-NaHCO ₃	6.8	12	6.8	36

Suelo 1 - Rendimiento de algodón (kg ha⁻¹): testigo 2 058; con P 2 244.

Suelo 2 - Rendimiento de algodón (kg ha⁻¹): testigo 3 678; con P 3 673.

¹ La suspensión suelo - resina se agitó toda la noche.

contenido de P disponible ya que el fluoruro de la solución extractora liberó el P ligado a Al.

Estos ejemplos muestran algunas de las limitaciones de los extractantes químicos al estimar el P disponible en el suelo.

Es conocido que valores de pH en el suelo de alrededor de 6 mejoran la disponibilidad de P. Esta situación se demostró con cuatro experimentos de campo en el Estado de São Paulo, Brasil, en los cuales se observó un incremento significativo en la concentración de P foliar en frijol, girasol y soya después de la aplicación de cal (columnas 2 y 3 en la **Tabla 4**). El análisis de las muestras de suelo de las parcelas recolectadas 2 años después de haberlas encalado produjo resultados enigmáticos. Las concentraciones de P extraídas con Mehlich 1 y Bray 1 no mostraron ningún efecto del encalado en la disponibilidad de P como se observa en las columnas 4 y 5 de la **Tabla 4**. Pero los resultados más curiosos se observaron cuando se extrajo P con el método Olsen. Los resultados muestran que a medida que se incrementa el pH en el suelo el contenido de P se reduce, un comportamiento contrario al esperado. Los contenidos de P extraídos con la resina tuvieron el mismo comportamiento que el contenido de P en las hojas. Los resultados demostraron claramente que la extracción de P con la resina evalúa de mejor forma el incremento en la disponibilidad de P producido por el encalado, mientras Mehlich 1 y Bray 1 no fueron

sensibles a estas variaciones de pH. Los resultados con método Olsen indicarían que existe disminución en P disponible a medida que se incrementa el pH, lo cual es inconsistente con las concentraciones de P en las hojas de los cultivos usados en el experimento.

En la **Figura 3** se muestra otro ejemplo del efecto del encalado en el incremento del P disponible cuando se usa el método de la resina. Se utilizaron mapas preparados con

tecnología de agricultura de precisión donde se delinearón los valores de pH y P antes (2007) y después del encalado (2008). La reducción de la acidez por el encalado, como lo indican los valores de pH, resultó en el incremento de P determinado por el método de la resina. Esto tiene importantes consecuencias económicas debido a que reduce la cantidad de fertilizante fosforado a aplicar.

Un método de análisis es bueno solamente si se puede usar a gran escala en el laboratorio. Aun cuando hace más de 50 años se demostró que la extracción con la resina de intercambio iónico era un método válido para la determinación de P disponible en el suelo, siempre se consideró que no era un método apropiado para el análisis de rutina en un laboratorio. Sin embargo, la resina de intercambio iónico se ha utilizado en Brasil desde 1983 (Raij et al., 1986; Raij, 1999) y al momento ha sido adoptada por alrededor de 100 laboratorios en este país. El procedimiento de la resina de intercambio iónico descrito por Raij et al. (1986) usa una mezcla de resinas de cationes y aniones que mejora la extracción de P y también permite la determinación de Ca, Mg y K intercambiables en el mismo extracto. El grupo del Instituto Agronómico de Campinas ha desarrollado equipos baratos que ahorran tiempo (Raij et al., 2001). Estos equipos son fabricados comercialmente por terceros, un aspecto importante para asegurar la adopción del método.

Tabla 3. Relación entre el efecto de la aplicación de fuentes de P en la absorción de este nutriente y el contenido de P disponible en el suelo determinado por tres diferentes métodos (Raij y Diest, 1980).

Evaluación	----- Fuentes de fósforo -----							
	Superfosfato triple		Superfosfato triple		Roca fosfórica Alvorada		Fosfato de aluminio calcinado	
	A la siembra		----- 75 días antes de la siembra -----					
	Valor	Índice*	Valor	Índice*	Valor	Índice*	Valor	Índice*
Absorción de P por la soya, mg maceta ⁻¹	4.3	100	2.3	53	1.1	27	137	10
P Resina, mg (dm ³) ⁻¹	12.7	100	7.9	62	1.7	13	4.6	39
P Bray 1, mg (dm ³) ⁻¹	37.9	100	39.6	105	7.9	21	39.4	104
P Mehlich 1, mg (dm ³) ⁻¹	27.9	100	24.6	88	42.8	153	1.5	5

* Las evaluaciones con superfosfato triple a la siembra son la base para evaluar el índice de relación con las otras formas de aplicación y determinación de P.

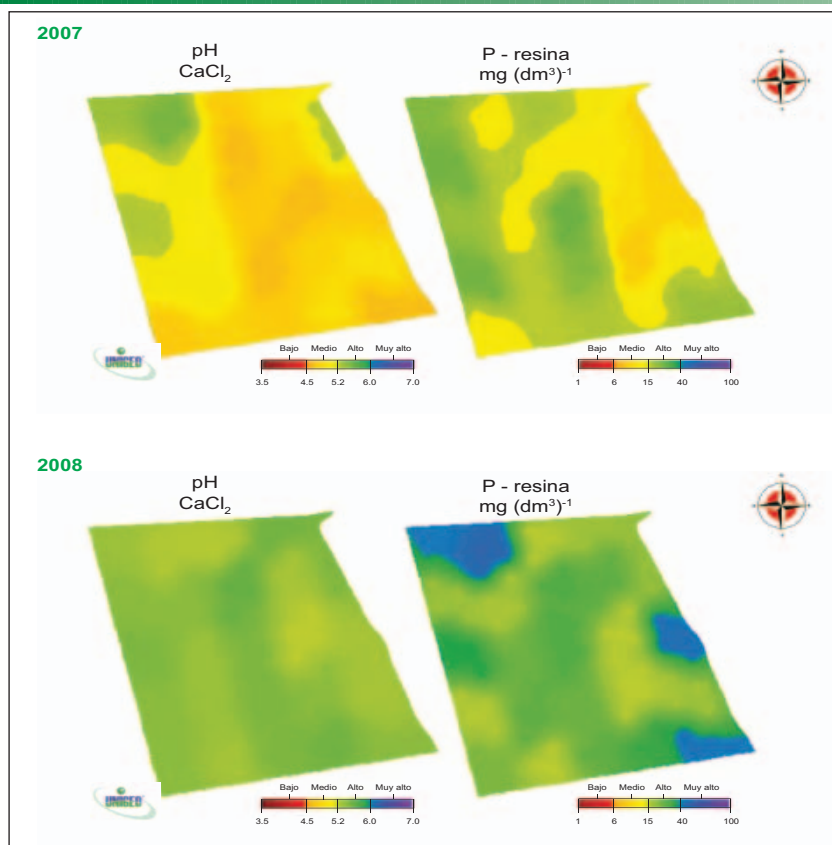


Figura 3. Imágenes de agricultura de precisión mostrando el pH en CaCl₂ y P-resina antes (2007) y después del encalado (2008).

Tabla 4. Relación entre pH del suelo en CaCl₂ 0.01 M, contenido de P en las hojas y P del suelo determinado por cuatro métodos de extracción (Raij y Quaggio, 1990).

Cultivo y suelo	P en el suelo, mg (dm ³) ⁻¹					
	pH CaCl ₂	P foliar, g kg ⁻¹	Mehlich 1	Bray 1	Olsen	Resina
Fríjol Suelo orgánico	3.8 d ¹	2.44 b	17 a	20 a	41 a	33 b
	4.2 c	3.21 a	18 a	21 a	33 b	36 ab
	4.7 b	3.25 a	18 a	20 a	26 c	38 ab
	5.1 a	3.26 a	19 a	18 a	19 d	43 a
	5.2 a	3.25 a	20 a	19 a	21 d	43 a
Girasol Ultisol	4.3 c	2.79 c	12 b	24 a	17 a	22 b
	4.6 c	3.27 b	12 b	22 a	17 a	26 ab
	5.3 b	3.81 a	16 a	25 a	16 a	33 ab
	5.5 ab	3.87 a	15 a	20 a	12 a	35 a
Soya Ultisol	5.7 a	3.80 a	16 a	20 a	12 a	37 a
	4.3 a	1.85 c	6 a	15 a	10 a	13 c
	4.8 d	2.06 bc	7 a	16 a	11 a	16 c
	5.5 c	2.44 ab	5 a	13 a	7 a	17 bc
Soya Oxisol	6.1 b	2.26 a	7 a	17 a	8 a	22 ab
	6.4 a	2.55 a	7 a	15 a	8 a	27 a
	4.5 d	2.35 b	9 a	20 a	18 a	16 c
	4.9 c	2.69 ab	8 a	22 a	15 ab	19 bc
	6.1 b	2.88 a	8 a	20 a	13 ab	23 b
	6.6 a	2.85 a	10 a	24 a	12 b	34 a

¹ Números seguidos por letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes al 5%.

Se ha demostrado que el P extraído por la resina de intercambio iónico es un indicador sensible de la disponibilidad de P en el suelo. Esta excelente alternativa para la determinación de P en el suelo permite optimizar las recomendaciones de fertilización con P y avanzar hacia mejores tecnologías de fertilización como la agricultura de precisión.

El Dr. Van Raij (bvanraij@terra.com.br) es investigador voluntario del Instituto Agronómico de Campinas y consultor en Nutrición Vegetal. El Dr. Cantarella y el Dr. Quaggio son investigadores del Instituto Agronómico de Campinas. El Dr. Prochnow es el Director de la oficina del IPNI en Brasil (pprochnow@ipni.net).

Los autores agradecen a UNIGEO por permitir el uso de sus imágenes de Agricultura de Precisión.

Bibliografía

Grande, M.A., N. Curi, and J.A. Quaggio. 1986. Disponibilidade de fósforo pelos extratores de Mehlich e resina em solos de várzea cultivados com arroz irrigado. Revista Brasileira de Ciência do Solo 10:45-50.

Raij, B. van. 1999. Bioavailable tests: alternatives to standard soil extractions. Communications in Soil Science and Plant Analysis 29:1553-1570.

Raij, B. van., J.C. Andrade, H. Cantarella and J.A. Quaggio. 2001. Chemical analysis for the evaluation of the fertility of tropical soils. Campinas: Instituto Agronômico, (in Portuguese)

Raij, B. van., and A. van. Diest. 1980. Phosphate supplying power of rock phosphates in an oxisol. Plant and Soil 55:97-104.

Raij, B. van, and J.A. Quaggio. 1990. Extractable phosphorus availability indexes as affected by liming. Communications in Soil Science and Plant Analysis 21:1267-1276.

Raij, B. van., J.A. Quaggio, and N.M. da Silva. 1986. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by ion-exchange resin procedure. Communications in Soil Science and Plant Analysis 17:547-566.

Silva, F.C., and B. van Raij. 1999. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. Pesquisa Agropecuária Brasileira 34:267-288.★