

# ADSORCIÓN DE FÓSFORO EN SUELOS DE LA ZONA CAFETERA DE COLOMBIA

Vanessa Catalina Díaz Poveda\*, Siavosh Sadeghian Khalajabadi\*

---

**DÍAZ P., V. C.; SADEGHIAN K., S. Adsorción de fósforo en suelos de la zona cafetera de Colombia. Revista Cenicafé 69(2):7-16. 2018**

El entendimiento de la dinámica del fósforo (P) en el suelo y los factores que determinan su disponibilidad para las plantas son esenciales en el manejo eficiente del nutriente, así como en su impacto ambiental. El objetivo de este trabajo fue evaluar la capacidad de adsorción de P de suelos representativos de la zona cafetera de Colombia y su relación con otras propiedades edáficas. Mediante la técnica de isotermas de adsorción se determinó la retención de fosfatos en muestras de suelo, procedentes de 14 departamentos y clasificados como Andisoles e Inceptisoles. Se utilizaron los modelos de Langmuir y Freundlich con el fin de explicar la capacidad de los suelos para retener el P y calcular la fracción adsorbida a una concentración de  $0,2 \text{ mg L}^{-1}$  en la solución de equilibrio, criterio que sirvió para su clasificación. La capacidad máxima de fijación de P varió entre 118 y  $3.333 \text{ mg kg}^{-1}$ . Los dos modelos empleados explicaron satisfactoriamente el fenómeno objeto de estudio, sin embargo, se optó por el de Langmuir, debido a que sus parámetros tienen significado físico. Según este modelo, las muestras de Antioquia y Tolima exhibieron una fijación muy alta, las de Caldas y Cauca alta, las de Caquetá, Casanare, La Guajira, Huila, Meta y Santander media, y las de Magdalena, Norte de Santander, Nariño y Quindío baja. Se encontró una correlación positiva y significativa de la fijación de P con los contenidos de la materia orgánica y las arcillas amorfas. Aunque los Andisoles retuvieron una mayor cantidad de P, el grado de la afinidad por el elemento varió entre estos.

**Palabras clave:** Isotermas de adsorción, mineralogía de arcillas, modelo de Langmuir, materia orgánica.

---

## PHOSPHORUS ADSORPTION IN SOILS OF THE COLOMBIAN COFFEE ZONE

Understanding the phosphorus (P) dynamic in soils and the factors that determine its availability for plants proves essential in the efficient management of the nutrient, as well as its environmental impact. The aim of this study was to evaluate the capacity for P adsorption of representative soils of the Colombian coffee-producing region and its relationship with other edaphic properties. Using the adsorption isotherm technique, phosphate retention for soil samples from 14 municipalities classified as Andisols and Inceptisols, was determined. The Langmuir and Freundlich models were used to explain the capacity of soils to retain P and calculate the adsorbed fraction at a concentration of  $0.2 \text{ mg.L}^{-1}$  in the equilibrium solution; a criterion that was used in its classification. Phosphorus maximum fixation capacity varied between 118 and  $3,333 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Although both models satisfactorily explained the phenomenon under study, the Langmuir model was selected, given that its parameters provide physical meaning. According to this model, samples from Antioquia and Tolima exhibited a very high fixation, those from Caldas and Cauca exhibited a high fixation, those from Caquetá, Casanare, Guajira, Huila, Meta and Santander a medium fixation, and those from de Magdalena, Norte de Santander, Nariño and Quindio low. A positive and significant correlation was found between P fixation capacity and the contents of organic matter and amorphous clays. Although Andisols retained a greater amount of P, the affinity degree for the element varied between these.

**Keywords:** Adsorption isotherms, clay mineralogy, Langmuir model, organic matter.

---

\*Asistente de Investigación e Investigador Científico III, respectivamente. Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

El fósforo (P) es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Su disponibilidad en la solución del suelo depende de la riqueza de los minerales presentes, las adiciones de fertilizantes y enmiendas, los aportes de residuos orgánicos, la absorción por las raíces, la actividad microbiana a través de la mineralización e inmovilización, las pérdidas por lixiviación y los procesos de disolución, adsorción, desorción y precipitación (13). La retención o fijación de P es consecuencia de las reacciones de adsorción y precipitación, en las que el elemento puede convertirse en formas poco solubles o insolubles (14). Así, en suelos con altos contenidos de P total puede presentarse una baja disponibilidad del nutriente para las plantas y los microorganismos (11).

La recomendación del suministro de P para los cultivos puede hacerse con base en el análisis de suelo, realizado a través de varios métodos, los cuales consisten en la extracción química del elemento por diferentes soluciones (18, 19), sin que se proporcione información acerca de la capacidad de su fijación (10). La capacidad de fijación resulta relevante, ya que el P aplicado según la necesidad establecida, puede ser fijado y quedar como no disponible para ser usado por las plantas; además, los suelos tienen una mayor o menor capacidad de retención del elemento de acuerdo con sus características fisicoquímicas, entre ellas, contenido de materia orgánica (MO), pH (25) y contenido de aluminio intercambiable ( $Al^{3+}$ ), que puede reaccionar con iones fosfato para formar compuestos insolubles (17, 20) y otros tipos de minerales (óxidos de aluminio, hierro y calcio), con los que puede formar enlaces por reacciones aniónicas específicas, además de su área superficial, entre otras (13).

Mediante el método de isoterma de adsorción de P, desarrollado por Fox y

Kamprath (12), es posible establecer los requerimientos de fertilizantes fosfóricos, teniendo en cuenta los factores de intensidad (disponibilidad en la solución del suelo) y capacidad (poder búfer del suelo). Esta técnica puede ser descrita por medio de modelos matemáticos, siendo los más conocidos y utilizados los de Langmuir y Freundlich. Estudios sobre el tema debaten cual ecuación se ajusta mejor a los resultados obtenidos; al respecto, Khan *et al.* (16) y Sanyal *et al.* (24), encontraron que la ecuación de Freundlich describe mejor la isoterma en todas las series analizadas, no obstante, y a pesar de que el modelo describe adecuadamente el fenómeno, no permite dar una interpretación a las constantes, ya que no tienen significado físico (22). Por su parte, el modelo de Langmuir ha sido frecuentemente utilizado para describir la adsorción de líquidos y de iones en solución por sólidos, la ventaja de su uso radica en la posibilidad de calcular la máxima capacidad de adsorción de P y una constante relacionada con la energía de adsorción del mismo (17, 25).

Algunas investigaciones se han enfocado en la adsorción de P, asociada a los contenidos de MO y arcillas. De acuerdo con Bravo *et al.* (4), en suelos ácidos del departamento del Cauca, la MO puede contribuir al aumento o disminución de la disponibilidad del elemento, dependiendo de su grado de humificación o mineralización. Por su parte, Obura (20) y Kisinyo *et al.* (17), concluyen que los minerales de arcilla responsables de la adsorción de P en suelos ácidos de Kenia y Brasil son principalmente kaolinita, goetita y gibsitita, predominando este último por tener mayor área superficial. En suelos derivados de cenizas volcánicas, en particular los Andisoles, la adsorción ocurre principalmente por arcillas como las alofanas y la imogolita (9). Estudios realizados por Chaves (7) permitieron entender la dinámica del fósforo en

el suelo y los métodos para medir su fijación. Por otro lado, Bravo *et al.* (3) demostraron la relevancia de conocer la capacidad de fijación de P de los suelos, específicamente de andisoles de la zona cafetera colombiana, información que debe tenerse en cuenta en los programas de fertilización, con el fin de aplicar la cantidad necesaria del elemento.

Para el cultivo de café los requerimientos de P se encuentran asociados a su significativo papel tanto en la etapa de almácigo como en la etapa de producción, al ser responsable de formar plantas vigorosas, con buen sistema radical y como promotor de la floración y el desarrollo del fruto (28). Dada la importancia del elemento y la necesidad de conocer su dinámica en el suelo, se desarrolló esta investigación de tipo exploratorio y descriptivo, con el objetivo de evaluar la capacidad de adsorción de P de diferentes suelos representativos de las zonas cafeteras del país y las propiedades relacionadas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Muestreo, preparación y caracterización de suelos.** Se emplearon muestras representativas de suelos provenientes de 14 departamentos cafeteros de Colombia, clasificados como Andisoles e Inceptisoles: Antioquia, Caldas, Caquetá, Casanare, Cauca, La Guajira, Huila, Magdalena, Meta, Nariño, Norte de Santander, Quindío, Santander y Tolima (Tabla 1). Las muestras se tomaron en lotes de café a 20 cm de profundidad, posteriormente se secaron en estufa a 40°C, se pasaron por tamiz de 10 mesh y se analizaron en sus propiedades químicas y físicas, de acuerdo con la metodología descrita por Carrillo (6): pH (método potenciométrico-relación suelo:agua desionizada 1:1 p/p), carbono orgánico (método Walkley-Black y valoración por colorimetría a 585 nm), bases (extracción con acetato de amonio pH 7,0), aluminio intercambiable

(extracción con KCl 1N), fósforo (extracción con Bray II, coloración Bray-Kurtz y lectura por colorimetría a 660 nm) y textura (Bouyoucos). La mineralogía de arcillas fue realizada por difracción de rayos X.

**Isotermas de adsorción de P.** Para determinar la capacidad de adsorción de P de los suelos seleccionados se empleó el método propuesto por Fox y Kamprath (12) con algunas modificaciones. Para ello, 3,0 g de suelo seco y tamizado se traspasaron a tubos cónicos de polipropileno de 50,0 mL, se adicionaron 30,0 mL de una solución de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0,01M con concentraciones crecientes de P, según el tipo de suelo (0 a 3.200 mg  $\text{kg}^{-1}$  de suelo). Los tubos se agitaron por 24 h y se centrifugaron a 4.000 r.p.m. durante 10 min, tiempo después del cual las muestras se filtraron, usando papel de filtro de 0,45  $\mu\text{m}$ ; finalmente, se cuantificó la concentración de P mediante el método de azul de molibdeno. Los análisis descritos se realizaron por triplicado para cada muestra de suelo. El P adsorbido se calculó con base en la diferencia entre la concentración inicial de la solución aplicada y la concentración final obtenida en la solución de equilibrio.

Se expresó el P adsorbido en función de su concentración en la solución de equilibrio, empleando los modelos linealizados de Langmuir y Freundlich. El modelo simple de Langmuir tiene la siguiente forma (Ecuación <1>):

$$\frac{x}{m} = \frac{K \cdot C \cdot b}{(1 + K \cdot C)} \quad <1>$$

Donde:

$x/m$  = concentración de P adsorbido, mg  $\text{kg}^{-1}$  de suelo

$C$  = concentración de P en solución, mg  $\text{L}^{-1}$

$b$  = máxima adsorción de P,  $\text{mg kg}^{-1}$  de suelo

$K$  = constante relacionada con la energía de enlace entre los iones fosfato y la superficie de las partículas del suelo,  $\text{mg L}^{-1}$

El modelo de Freundlich tiene la siguiente forma (Ecuación <2>):

$$\frac{x}{m} = K \cdot C^n \quad \langle 2 \rangle$$

Donde:

$x/m$  = concentración de P adsorbido,  $\text{mg kg}^{-1}$  de suelo

$C$  = concentración de P en solución,  $\text{mg L}^{-1}$

$K$  y  $n$  son constantes ajustadas para el modelo, no tienen significado físico

Con base en las dos ecuaciones obtenidas para cada suelo se calculó el P adsorbido a una concentración de  $0,2 \text{ mg L}^{-1}$  ( $q$ ) en la solución de equilibrio; cantidad disponible del elemento que se considera adecuada para un crecimiento óptimo de las plantas (21). Posteriormente, cada suelo se clasificó en su poder de fijación para  $q$ , de acuerdo con los rangos establecidos por Juo y Fox (15): menor de 10 muy baja, entre 10-100 baja, entre 101-500 media, entre 501-1.000 alta y mayor de 1.000  $\text{mg kg}^{-1}$  muy alta.

Para cada suelo se obtuvieron los valores de los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de las ecuaciones de Langmuir <1> y Freundlich <2>, y la Raíz del Cuadrado Medio del Error (RCME), como indicadores de la bondad del ajuste; así mismo, se empleó la correlación de Pearson con el fin de valorar la asociación entre las propiedades

de los suelos y los parámetros  $b$  y  $q$  de las ecuaciones. La información se tabuló en Excel (Microsoft Office Standard, 2016) y se analizó en el software SAS versión 9,4 (SAS Institute, 2012).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

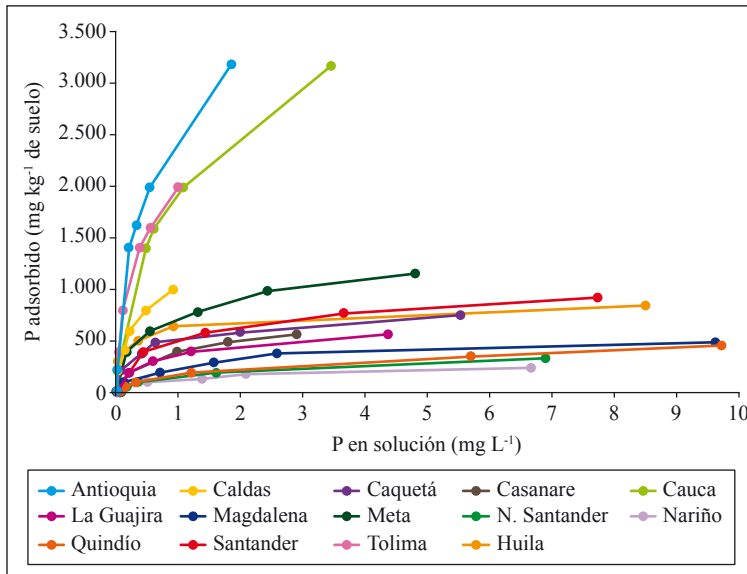
Los suelos estudiados fueron disímiles en su capacidad para adsorber P (Figura 1). Las muestras procedentes de Antioquia, Cauca y Tolima presentaron una alta capacidad de fijación y, por lo tanto, fue necesario aplicar las máximas concentraciones del elemento ( $3.200 \text{ mg kg}^{-1}$ ) con el fin de lograr cambios significativos en la solución de equilibrio. En contraste, los suelos de Casanare, Magdalena, La Guajira, Huila, Norte de Santander y Quindío requirieron  $800 \text{ mg kg}^{-1}$ , y Nariño solo  $300 \text{ mg kg}^{-1}$ .

De acuerdo con el modelo de Langmuir (Tabla 2), las muestras de Antioquia, Caldas, Cauca y Tolima exhibieron mayor capacidad para la fijación de P (entre  $1.111$  y  $3.333 \text{ mg kg}^{-1}$ ) que las de Magdalena y Nariño ( $263$  y  $556 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente), resultado que se reflejó en sus valores de  $k$  (parámetro asociado a la energía de enlace de los iones fosfato con la superficie de las partículas del suelo).

Aunque el modelo de Freundlich también describe adecuadamente el fenómeno (Tabla 2), presenta el inconveniente de no tener una interpretación a las constantes y, en razón de ello, no tiene significado físico; sin embargo, el valor de  $K$  es asumido como la máxima capacidad de adsorción. Según este modelo, las muestras de suelo con mayor capacidad de adsorción de P se registraron en Antioquia, Caldas, Cauca y Tolima, con valores entre  $1.125$  y  $2.782 \text{ mg kg}^{-1}$  de P, y las menores en Nariño y Quindío, con valores de  $118$  y  $149 \text{ mg kg}^{-1}$  de P, respectivamente.

**Tabla 1.** Clasificación y propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los suelos analizados.

Departamento	Orden	pH	MO	K	Ca	Mg	Al	P	Arcillas cristalinas		Arcillas amorfas		
			%	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	%	%	Ar	L	A	
Antioquia	Andisol	4,96	13	0,16	0,74	0,31	1,15	3	21,30	78,70	22,42	39,71	37,87
Caldas	Andisol	6,28	7,55	0,11	5,95	1,26	0,00	21	40,80	59,20	18,42	31,57	50,02
Caquetá	Inceptisol	4,61	2,60	0,11	0,39	0,21	1,17	2	82,20	17,80	42,42	15,71	41,87
Casanare	Inceptisol	4,15	2,53	0,07	0,2	0,10	2,69	26	85,70	14,30	22,42	19,57	58,02
Cauca	Andisol	5,28	24,98	0,26	0,77	0,49	1,06	2	23,80	76,20	30,42	39,57	30,02
La Guajira	Inceptisol	5,07	2,89	0,33	2,8	0,70	0,52	3	72,80	27,20	50,42	23,57	26,02
Huila	Inceptisol	5,70	4,74	0,30	10,05	2,76	0,06	39	78,70	21,30	17,00	32,00	51,00
Magdalena	Inceptisol	5,04	2,99	0,14	4,27	1,10	0,44	9	79,00	21,00	30,42	31,57	38,02
Meta	Inceptisol	4,49	2,30	0,23	1,35	0,62	5,00	5	65,30	34,70	58,27	23,71	18,02
Norte de Santander	Inceptisol	4,63	5,50	0,12	5,79	1,10	1,44	122	72,30	27,70	27,71	39,28	33,01
Nariño	Inceptisol	5,31	2,71	0,27	3,67	1,41	0,14	16	69,70	30,30	34,27	19,86	45,87
Quindío	Andisol	4,91	6,01	0,12	2,57	0,50	0,76	146	46,80	53,20	27,57	19,28	53,15
Santander	Inceptisol	4,31	5,11	0,09	0,35	0,19	2,79	10	93,60	6,40	26,27	15,86	57,87
Tolima	Andisol	5,62	9,45	0,13	2,12	0,66	0,00	1	25,30	74,70	14,56	39,57	45,87



**Figura 1.** Isothermas de adsorción de P de suelos representativos de la zona cafetera de Colombia.

**Tabla 2.** Parámetros de las isothermas de Langmuir y Freundlich, obtenidas para suelos representativos de la zona cafetera de Colombia y la respectiva clasificación de fijación.

Departamento	Modelo de Langmuir				Modelo de Freundlich			
	<i>b</i> mg kg <sup>-1</sup>	<i>K</i> mg L <sup>-1</sup>	<i>q</i> mg kg <sup>-1</sup>	Clasificación	<i>N</i>	<i>K</i>	<i>q</i> mg kg <sup>-1</sup>	Clasificación
Antioquia	3.333,33	3,00	1.250,00	Muy alta	0,60	2.782,49	1.054,61	Muy alta
Caldas	1.111,11	9,00	714,29	Alta	0,49	1.124,73	510,83	Alta
Caquetá	769,23	2,60	263,16	Media	0,29	485,462	302,36	Media
Casanare	666,67	1,88	181,82	Media	0,47	369,481	172,55	Media
Cauca	3.333,33	1,50	769,23	Alta	0,57	1.873,94	751,18	Alta
La Guajira	714,29	1,08	126,58	Media	0,31	343,676	207,50	Media
Huila	1.000,00	3,33	400,00	Media	0,19	599,60	444,62	Media
Magdalena	555,56	0,90	84,75	Baja	0,38	225,698	121,95	Media
Meta	1.250,00	1,60	303,03	Media	0,32	718,094	430,64	Media
Norte de Santander	666,67	0,28	35,71	Baja	0,49	137,126	62,70	Baja
Nariño	263,16	1,09	46,95	Baja	0,42	118,167	60,49	Baja
Quindío	666,67	0,35	43,48	Baja	0,49	149,068	67,58	Baja
Santander	1.111,11	0,75	144,93	Media	0,29	513,731	323,33	Media
Tolima	3.333,33	3,00	1.250,00	Muy alta	0,45	1.985,85	967,02	Alta

*q* = P adsorbido por unidad de masa de suelo a una concentración de equilibrio de 0,2 mg L<sup>-1</sup>.

De los 14 suelos, 12 coincidieron en la clasificación realizada con la aplicación de los dos modelos. Se obtuvieron los siguientes rangos de fijación, de acuerdo con los criterios establecidos por Juo y Fox (15):

- Muy alta: Antioquia y Tolima.
- Alta: Caldas y Cauca.
- Media: Caquetá, Casanare, La Guajira, Huila, Meta y Santander.
- Baja: Magdalena, Norte de Santander, Nariño y Quindío.

De acuerdo con Alvarado *et al.* (1) y Soto (3), la alta fijación de fosfatos puede asociarse a la mineralogía de los suelos, específicamente, las fijaciones alta y muy alta pueden atribuir a la presencia de óxidos y materiales amorfos. Con respecto a estos últimos materiales las muestras provenientes de Antioquia, Cauca y Tolima presentaron los siguientes porcentajes: 78, 76 y 75, respectivamente. Los anteriores suelos pertenecen al orden Andisol; sin embargo, su capacidad para fijar el P dista de otras muestras con la misma clasificación, procedentes de los departamentos de Caldas y Quindío.

En la Tabla 3 se consignan para cada suelo los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y la Raíz del Cuadrado Medio del Error (RCME), como indicadores de la bondad del ajuste de los modelos. En ambos casos se presentaron valores altos de  $R^2$  (mayores de 0,95) y RCME, resultado que sugiere el uso de cualquiera de estos. Por lo anterior y dado que los parámetros del modelo de Langmuir tienen significado, se sugiere emplearlo para explicar el fenómeno de adsorción de P de los suelos objeto de estudio.

Los dos modelos han sido ampliamente empleados en investigaciones similares; en ocasiones los seleccionan directamente mientras que en otros los contrastan. Son ejemplo del primer caso, los reportes de Sato y Comerford (25) y Kisinyo (17) para el modelo de Langmuir, con valores de  $R^2$  entre 0,970 y 0,993. En estudios realizados por Dubus y Becquer (8) y Khan *et al.* (16) compararon los dos modelos, concluyendo que ambos proporcionan un buen ajuste de los datos ( $R^2 > 0,95$ ), resultados equivalentes a los encontrados en este trabajo. De acuerdo con Khan *et al.* (16), la ecuación de Langmuir indica buen ajuste a altas concentraciones de P, mientras que la ecuación de Freundlich muestra que la afinidad disminuye exponencialmente al aumentar la adsorción. Lo anterior, según Bowden *et al.* (5), se debe a que la energía de enlace se reduce a medida en que se incrementa la saturación de P en la superficie del absorbente.

En la Tabla 4 se consignan los coeficientes de correlación obtenidos entre las propiedades de los suelos y el parámetro  $b$  del modelo de Langmuir y la adsorción a  $0,2 \text{ m L}^{-1}$  en la solución, es decir,  $q$ . La MO y el porcentaje de arcillas amorfas presentaron una asociación positiva con los dos parámetros; por su parte, a menor contenido de la fracción cristalina de arcillas, menor capacidad de fijación de P.

El efecto de la MO en el proceso de fijación de P ha sido discutido por varios autores. Algunos sostienen que los compuestos orgánicos, como consecuencia de su dominante carga negativa, recubren los óxidos de Fe y Al para formar complejos que inmovilizan la MO, reduciendo así la adsorción de P o reemplazando los iones fosfato (13). Por otro lado, Espinoza (9) y Sollins (26), explican que los suelos derivados de cenizas volcánicas, conformados por arcillas amorfas (alofana e imogolita), tienen la capacidad de formar

complejos humus-Al, donde el carbono (C) queda inactivo, y es este complejo el que fija el P en los suelos. De esta manera, se concluye que la fijación de P está estrechamente relacionada con la mineralogía de arcillas y el contenido de MO, aspectos que presentan una estrecha relación, en especial para los suelos derivados de cenizas volcánicas.

Se presentó una correlación positiva y significativa entre el contenido de limos y la fijación de P; en este sentido, se hubiera esperado una mayor influencia de las arcillas antes que los limos. Es posible atribuir parte de este resultado a las imprecisiones del método empleado para evaluar la textura, particularmente en lo relacionado con la destrucción de la materia orgánica. Al respecto

se puede comentar que las arcillas del suelo suelen unirse a la materia orgánica y así formar agregados del tamaño de limos. Parte de lo anterior se justifica por la relación que se concentró entre el tipo de arcilla y el fenómeno objeto de estudio ( $R^2=0,816$ ).

Los resultados obtenidos coinciden con los reportes de Ribeiro *et al.* (22), quienes no hallaron relación entre los contenidos de arcilla y los valores de capacidad máxima de adsorción de P, sugiriendo mayor influencia de la calidad mineralógica de esta fracción. Por otro lado, Boschetti *et al.* (2), señalan a las arcillas como el factor principal de variación en la capacidad de adsorción de P de los suelos, sin encontrar relación con el contenido de carbono orgánico.

**Tabla 3.** Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y raíz cuadrada media del error (RCME) de las isotermas de adsorción de P para suelos representativos de la zona cafetera de Colombia.

Departamento	Modelo de Langmuir		Modelo de Freundlich	
	$R^2$	RCME	$R^2$	RCME
Antioquia	0,990	167,982	0,965	413,703
Caldas	0,999	29,705	0,986	882,900
Caquetá	0,993	50,142	0,960	42,676
Casanare	0,991	25,494	0,980	24,841
Cauca	0,978	173,237	0,983	304,855
La Guajira	0,994	39,821	0,991	19,016
Huila	1,000	85,414	0,954	54,280
Magdalena	0,995	28,088	0,973	37,187
Meta	0,991	93,031	0,998	11,382
Norte de Santander	0,946	54,205	0,986	12,950
Nariño	0,993	12,472	0,974	9,624
Quindío	0,968	48,088	0,982	14,050
Santander	0,993	79,189	0,996	12,832
Tolima	0,958	117,371	0,985	140,743



**Tabla 4.** Coeficientes de correlación de Pearson entre las propiedades de los suelos y el parámetro *b* de la ecuación de Langmuir y *q*.

Variable	Parámetro <i>b</i>		<i>q</i>	
	<i>r</i>	<i>α</i>	<i>r</i>	<i>α</i>
pH	0,247	0,395	0,458	0,100
MO	0,812	0,000	0,626	0,017
K	0,038	0,898	-0,036	0,903
Ca	-0,315	0,273	-0,140	0,632
Mg	-0,250	0,388	-0,099	0,736
Al	-0,074	0,801	-0,219	0,451
P	-0,352	0,217	-0,406	0,149
Arcillas cristalinas	-0,816	0,000	-0,815	0,000
Arcillas amorfas	0,816	0,000	0,815	0,000
Ar	-0,309	0,283	-0,433	0,122
L	0,673	0,008	0,661	0,010
A	-0,195	0,504	-0,056	0,849

Los resultados obtenidos permiten concluir que:

- Los suelos de la zona cafetera de Colombia difieren en su capacidad para fijar el fósforo.
- La capacidad de fijación de fosfatos se incrementa con el aumento de los contenidos de la materia orgánica y arcillas amorfas.
- Aunque los Andisoles retienen una mayor cantidad de P, el grado de la afinidad por el elemento varía entre estos.
- Los modelos de Langmuir y Freundlich explican de manera satisfactoria el fenómeno de adsorción para los suelos estudiados.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a Claudia Ospina, Janneth Escudero y Carlos Unigarro.

#### LITERATURA CITADA

1. ALVARADO, A.; MATA, R.; CHINCHILLA, M. Arcillas identificadas en suelos de costa rica a nivel generalizado durante el período 1931-2014: Historia, metodología de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agronomía costarricense* 38(1):75-106. 2014.
2. BOSCHETTI, N.G.; QUINTERO, C.E.; BENAVIDEZ, R.A. Caracterizaçao do fator capacidade de fósforo em solos de entre ríos, Argentina. *Revista brasileira de ciencia do solo* 22(1):95-99. 1998.
3. BRAVO G., E.; GÓMEZ A., A. Capacidad de fijación de fósforo en seis unidades de suelos andosólicos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 25(1):19-29. 1974.
4. BRAVO, I.; MONTOYA, J.C.; MENJIVAR, J.C. Retención y disponibilidad de fósforo asociado a la materia orgánica en un Typic Melanudands del departamento del Cauca, Colombia. *Acta agronómica* 62(3):261-267. 2013.
5. BOWDEN, W.; POSNER, A.M.; QUIRK, P. Ionic adsorption on variable charge surfaces mineral surfaces: Theoretical charge development and titration curves. *Australian journal of soil research* 15(2):121-136. 1977.

6. CARRILLO P., I.F. Manual de laboratorio de suelos. Chinchiná : Cenicafé, 1985.
7. CHAVES, R. Fijación de fosfatos en el suelo. Cenicafé 1(12):36-40. 1950.
8. DUBUS, I.G.; BECQUER, T. Phosphorus sorption and desorption in oxide-rich ferrasols of New Caledonia. Australian journal of soil research 39(2):403-414. 2001.
9. ESPINOZA, J. Fijación de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica. Informaciones agronómicas 55:5-8. 2004.
10. FIXEN, P.E.; GROVE, J.H. Testing soil for phosphorus. p. 141-180. En: Westerman, R.L. Soil testing and plant analysis. Wisconsin : Soil science society of America, 1990.
11. FOTH, H.; ELLIS, B. Soil fertility. Florida : CRC Press, 1996.
12. FOX, R.L.; KAMPRATH, E.J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. Soil science society of America proceedings 34:902-907. 1970.
13. HAVLIN, J.L.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. Soil fertility and fertilizers, an introduction to nutrient management. New Jersey : Prentice Hall, 2014.
14. JONES, C.; JACOBSEN, J. Phosphorus cycling, testing and fertilizer recommendations: Nutrient management. Montana state university 4:1-15. 2005.
15. JUO, A.; FOX, R. Phosphate sorption characteristics of some bench-mark soils of west Africa. Soil science 124(8):370-376. 1977.
16. KHAN, Q.U.; KHAN, M.J.; SAIF-UR, R.; ULLAH, S. Comparison of different models for phosphate adsorption salt inherent soil series of Dera Ismail Khan. Soil and environment 29(1):11-14. 2010.
17. KISINYO, P.O.; OTHIENO, C.O.; GUDU, S.O.; OKALEBO, J.R.; OPALA, P.A.; MAGHANGA, J.K.; NG'ETICH, W.K.; AGALO, J.J.; OPILE, R.W.; KISINYO, J.A.; OGOLA, B.O. Phosphorus sorption and lime requirements of maize growing acid soils of Kenya. Sustainable agriculture research 2(2):116-123. 2013.
18. KLEINMAN P., J.A.; SHARPLEY A., N.; GARLEY, K.; JARRELL W., M.; KUO, S.; MENON R., G.; MYERS, R.; REDDY K., R.; SKOGLEY E., O. Interlaboratory comparison of soil phosphorus extracted by various soil test methods. Communications in soil science and plant analysis 32(15/16):2325-2345. 2001.
19. NEYRUD, J.A.; LISCHER, P. Do different methods used to estimate soil phosphorus availability across Europe give comparable results? Journal of plant nutrition and soil science 166(4):422-431. 2003.
20. OBURA, P.A. Effects of soil properties on bioavailability of aluminium and phosphorus in selected Kenyan and Brazilian soils. Indiana : Purdue university, 2008. Thesis: Doctorado.
21. PIERZYNSKI, G.; MADOWEEL, R.; THOMAS, J. Chemistry, cycling and potential movement of inorganic phosphorus in soils. Phosphorus: Agriculture and the environment 46:53-54. 2005.
22. QUINTERO, C.E.; BOSCHETTI, N.G.; BENAVIDEZ, R.A. Estimación de la capacidad máxima de adsorción de fosfatos en suelos de Entre Rios (Argentina). Ciencia del Suelo 14: 79-82. 1996.
23. RIBEIRO, D.; TAVARES, F.H.; SANTOS, D.; ALVES, J.; BEZERRA, R.; FERREIRA, R. Fósforo em solos representativos do estado da Paraíba. I - isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. R. Bras. Ci. Solo, 33:623-632, 2009.
24. SANYAL, S. K.; DE DATTA, S. K.; CHAN, P. Y. Phosphate sorption-desorption behavior of some acidic soils of south and southeast Asia. Soil Sci. Soc. Am. J. 57 (4): 937-945. 1993.
25. SATO, S.; COMERFORD, N. B. Influence of soil pH on inorganic phosphorus sorption and desorption in a humid brazilian ultisol. R. Bras. Ci. Solo. 29: 685-694. 2005.
26. SOLLINS, P. (1991). Effects of soil microstructure on phosphorus sorption in soils of the humid tropics. In Tielsen, H.; Hernandez López, D.; Salcedo, L. (eds.), Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems. Saskatchewan Institute of pedology. Saskatoon, Canada.
27. SOTO, J.A. Formas de fósforo y su liberación en andisoles de la región Central Oriental de Costa Rica. Tesis Doctoral. Universidad Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. España. 155 p, 1998.
28. VINASCO, C. A.; CARRILLO, I. F. El fósforo en el suelo y su importancia en el cultivo del café. FNC, Cenicafé, Boletín Técnico 12: 35-36. 1987.