



Adsorción de fósforo en suelos de cultivo en Beni y La Paz

Valerio Choque Flores^{1,*}, Ángel Maldonado¹, Rigoberto Choque¹, Rómulo Gemio Siñani¹,
Ariana Zeballos Espinoza², Mario Blanco Cazas²

¹Instituto de Investigaciones Químicas IIQ-Básica & Aplicada, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz; ²Instituto de Investigaciones Geológicas y del Medio Ambiente IIGEMA, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz

Keys: *Phosphorus, pH, Soils, Texture, Adsorptions, Isotherm*; **Claves:** *Fósforo, pH, Suelos, Textura, Adsorción, Isotherma*.

ABSTRACT

Phosphorus adsorption in cultivated soils in Beni and La Paz. In this work, the adsorption of phosphorus from solution in cultivated soils to Beni and La Paz department was studied using different adsorption isotherm models. The cultivated soils were characterized by soil texture, percentage of organic matter and organic carbon, and pH. The phases present were identified by X-ray diffraction. The results of phosphorus adsorption obey a type L model, according to the Giles classification; whose results after linear regression, are assimilated to a Langmuir type behavior with maximum adsorption capacities of the samples (M4), (MC), (MG) and (MN) of 0.0768, 11.06, 1.228, and 22.88 mg P/g soil respectively.

RESUMEN

En el presente trabajo se estudió la adsorción de fósforo en solución en suelos de cultivo del departamento del Beni y de La Paz, mediante los distintos modelos de isotermas de adsorción. Los suelos de cultivo, se caracterizaron mediante la textura del suelo, el % de materia orgánica y carbono orgánico y pH. Se identificó por difracción de Rayos X las fases presentes. Los resultados de la adsorción de fósforo, obedecen a un modelo tipo L, según la clasificación de Giles; cuyos resultados luego de la regresión lineal, se asimila a un comportamiento del tipo Langmuir con capacidades máxima de adsorción de las muestras (M4), (MC), (MG) y (MN) de 0,0768 , 11,06 , 1,228 , y 22,88 mg P/ g suelo respectivamente.

Revista Boliviana de Química, 2026, 43, 43-52
ISSN 0250-5460, Rev. Bol. Quim. Paper edition
ISSN 2078-3949, Rev. boliv. quim. e-edition, Jan-Jun
30 junio 2026, <https://doi.org/10.53287/pyii9560fa64t>
© 2026 Universidad Mayor de San Andrés,
Facultad de Ciencias Puras y Naturales,
Carrera Ciencias Químicas, Instituto de Investigaciones Químicas
<https://bolivianchemistryjournaliiq.umsa.bo>

¹Received October 23, 2025, accepted June 1, 2026, published June 30, 2026. *Mail to: valeriorenechoqueflores@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Los suelos constituyen un recurso natural esencial que proporciona los nutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas, siendo su aplicación en cultivos de gran relevancia. Dentro del suelo existen macronutrientes que se presentan en forma iónica; cuya presencia trae beneficios a las plantas y su deficiencia genera consecuencias negativas^{1 2 3}. Considerando el beneficio de la planta, los nutrientes principales que necesita la planta, se asocian a los elementos nitrógeno, fósforo y potasio (NPK). De todos ellos, llama la atención el fósforo, siendo un nutriente esencial que posee una amplia variedad de funciones en el organismo animal y ha sido estudiado por mucho tiempo. En los últimos años, el fósforo ha recibido particular interés siendo un nutriente esencial y factor del crecimiento de las plantas en suelos con contenido bajo de este elemento y que pueden ser fertilizados con abonos fosfatados o estiércol animal⁴. De acuerdo a resultados agronómicos, la cantidad total de P en la capa arable del suelo puede oscilar entre 200 y 5 000 mg kg⁻¹⁵, pero sólo menos de 1 % está disponible para la planta. El fósforo tiende a formar compuestos débilmente solubles con cationes mono y divalentes, lo que limita su disponibilidad para las plantas. Por esta razón, la cantidad de fósforo de la solución suelo es muy pequeña. Las plantas que crecen en el suelo, absorben esta pequeña cantidad de la solución suelo, que a su vez se encuentra en equilibrio con el fósforo de la fase sólida. Así, cada una de las formas químicas del suelo contribuye de manera distinta a enriquecer el fósforo disponible para el cultivo.

Dado que el fósforo del suelo está estrechamente relacionado con el pH, se realizó una simulación de las especies presentes utilizando el programa MEDUSA, donde en la Figura 1, se muestra el diagrama de fases del pH en función de la fracción de especies presentes en solución.

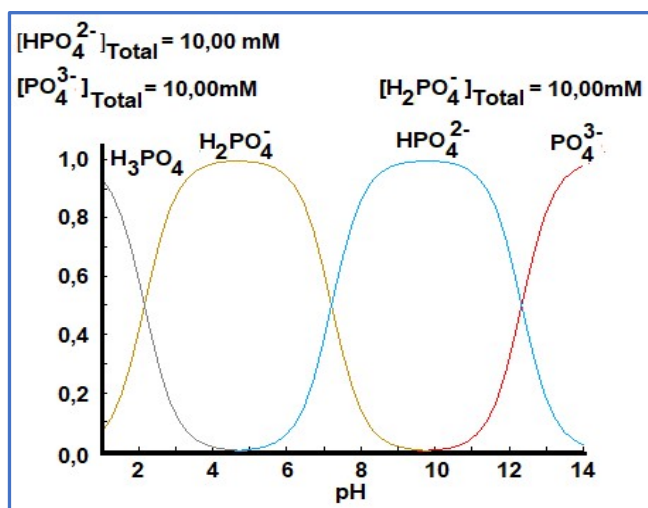


Figura 1. Diagrama de fases en función del pH de las especies de fósforo presentes

Se puede observar en la Figura 1, el cambio de especies en función del pH, donde se destaca que, a un pH ácido, se favorece la formación de las especies H_3PO_4 y H_2PO_4^- , y a un pH básico se favorece la formación de las especies HPO_4^{2-} y PO_4^{3-} . Los procesos como la desorción, solubilización o mineralización permiten que la planta tenga formas aprovechables de P (H_2PO_4^- y HPO_4^{2-}), aunque son escasas en la mayoría de los suelos a pesar del contenido alto de P total⁶. El P es indispensable en el metabolismo de las plantas⁷.

Cuando la concentración de P es baja en la solución del suelo dominan las reacciones de adsorción y cuando es alta la precipitación puede tener lugar⁸. Como la concentración de fósforo debe ser baja para favorecer los procesos de adsorción en suelos, este es un fenómeno superficial. Los datos de adsorción en suelos comúnmente son representados por isotermas de adsorción en las cuales un gráfico relaciona la cantidad de adsorbato retenida por un sólido como una función de la concentración de adsorbato en solución que está en equilibrio con ese sólido. La forma de la línea de la isoterma sugiere (pero no confirma) información acerca de la interacción adsorbato-adsorbente. Con este fin, las isotermas han sido clasificadas en 4 tipos diagramados como se muestra en la Figura 2.

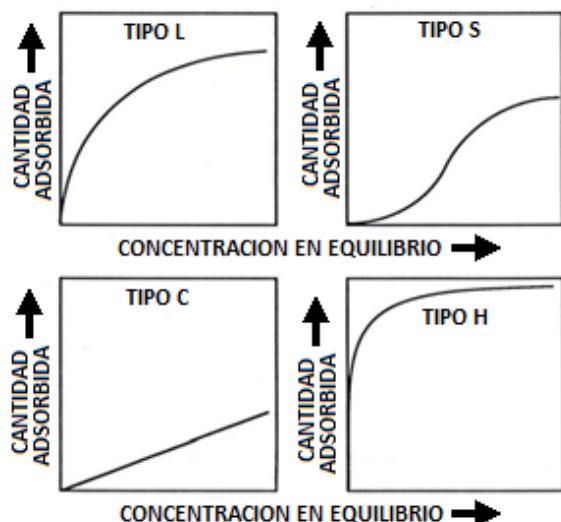


Figura 2. Clasificación de isothermas de adsorción⁹

Donde:

1. Isotherma del Tipo L (Langmuir), refleja una relativa alta afinidad entre el adsorbato y adsorbente, y usualmente indica quimisorción.
2. Isotherma tipo S, sugiere una —adsorción cooperativa, la cual opera si la interacción adsorbato-adsorbente es más fuerte que la interacción adsorbente-adsorbato. Esta condición favorece la agrupación de moléculas de adsorbato en la superficie porque se enlazan más fuerte con otros que con la superficie.
3. Isotherma tipo C, (Partición constante), sugiere una afinidad relativa constante de las moléculas del adsorbato por el adsorbente, es usualmente observada solo en bajos rangos de adsorción. La desviación de la isoterma lineal es común a altos niveles de adsorción. No obstante, muchos compuestos orgánicos populares de interés en suelos son totalmente adsorbidos a bajas concentraciones; la isoterma lineal de tipo C es a menudo una descripción razonable del comportamiento de adsorción.
4. Isotherma de tipo H, indica una interacción muy fuerte adsorbato-adsorbente (Quimisorción), siendo un caso extremo del caso tipo L. A menudo, no se encuentran estas isothermas para moléculas orgánicas; porque pocas de ellas, forman enlaces iónicos o covalentes fuertes con los coloides de los suelos.

La adsorción de iones del tipo: Zn^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} fueron ampliamente estudiados^{10 11 12 13 14 15}. Asimismo, el grupo de investigación realizó con éxito un estudio de adsorción de Mg^{2+} en un suelo de cultivo¹⁶. Y, por otro lado, si bien la adsorción de fósforo está ampliamente estudiada en especial en plantaciones de café¹⁷ y tierras oscuras de china¹⁸ hay poca información de adsorción de fósforo en suelos de cultivo agrícolas.

El presente estudio analiza el proceso de adsorción de fósforo en suelos agrícolas de los departamentos del Beni y La Paz, aplicando modelos de isothermas de Langmuir, Freundlich y Temkin para determinar la capacidad máxima de adsorción

EXPERIMENTAL

Se seleccionaron cuatro muestras de suelos, las cuales provienen de dos localidades que son: una muestra de suelo chaquada (M4) de la localidad de Yucumo que pertenece al municipio de San Borja del departamento del Beni y tres muestras de la localidad de Palos Blancos del departamento de La Paz, las cuales, se tomaron de distintos tipos de plantaciones de frutales, y se asignaron como: Muestra de Cacao (MC), muestra de Guineo (MG) y muestra de naranja (MN). Las cuatro muestras de suelo fueron secadas a temperatura ambiente y homogenizadas, para luego ser tamizadas en malla de tamaño 0,02mm y secadas al sol todo el día y luego secadas en una estufa a 50°C toda la noche, para luego ser guardadas para su respectiva caracterización.

El trabajo se basó en una metodología experimental cuantitativa, con énfasis en la corrección entre propiedades físico-químicas del suelo y su capacidad de adsorción del fósforo. Se aplicaron métodos estandarizados de laboratorio (Bouyoucos¹⁹, Walkley & Black (1934)²⁰), técnicas instrumentales (DRX, FRX, espectrofotometría UV-Vis) y análisis estadístico de modelos matemáticos de isothermas, con el fin de identificar el modelo que mejor describe el comportamiento de adsorción del fósforo donde la isoterma de Langmuir resultó ser el predominante.

La textura de suelo y el porcentaje de materia orgánica y carbono orgánico se realizó en los Laboratorios de Calidad Ambiental (LCA). En el primer caso, se usó el método hidrométrico de Bouyoucos¹⁹, donde la muestra de suelo seco se dejó reposar unos minutos para luego agitarlo y dejar la solución en suspensión, y proceder a la medida de los resultados. Para el porcentaje de materia orgánica y carbono orgánico se utilizó el método propuesto por Walkley & Black²⁰ que consiste en la oxidación húmeda de la muestra de suelo con dicromato de potasio en medio ácido, que produce una reducción del dicromato, equivalente al contenido de C que es oxidado. En segunda instancia, el dicromato residual es luego titulado con sal ferrosa. La lectura del pH y la conductividad iónica del suelo se determinó en un pHmetro marca DENVER INSTRUMENT UB-10 UltraBASIC.

El análisis mineralógico del suelo de cultivo de fases sólidas cristalinas se realizó en un equipo de Difracción (DRX), PanAnalytical Expert Plus con tubo generador de Rayos X de Cu (cobre) y filtro de Ni, dando radiación K alfa del Cu con longitud de onda de 1.54178 Å, bajo las condiciones de operación: Radiación a 40 Kv. y 40mA., rango de registro de 3° a 60°, detección con XCELERATOR de 125 canales y escala de detección automática.

Para el estudio del comportamiento de los procesos de adsorción se siguió de la siguiente manera: se pesó 2,0 g de suelo en distintos recipientes y se añadió 20 ml de soluciones preparadas de fósforo a partir de fosfato diácido de potasio (KH₂PO₄) (99,9% SIGMA) a distintas concentraciones de 1 ppm hasta 50 ppm. Estas muestras se dejaron en reposo durante 10 días a 25°C, para luego retirar las soluciones, realizar las diluciones respectivas y caracterizarlas mediante un equipo de espectrofotometría marca PERKIN ELMER a 840 nm usando el método del ácido ascórbico a partir de la formación de un complejo coloreado del fósforo con heptamolibdato de amonio realizándose las lecturas por triplicado. Con los resultados obtenidos se construyó las respectivas gráficas del isothermas de adsorción según el comportamiento lineal, Freundlich, Langmuir y Temkin, respectivamente. Luego se realizó la regresión lineal para indicar el tipo de comportamiento de adsorción de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

Tabla 1. Ecuaciones usadas para el comportamiento del proceso de adsorción

Freundlich	$q_e = K_F \cdot C_e^{\frac{1}{n}}$	$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F$
Langmuir	$q_e = \frac{q_0 \cdot K_F \cdot C_e}{1 + K_F \cdot C_e}$	$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_0 \cdot K_F} \left(\frac{1}{C_e} \right) + \frac{1}{q_0}$
Temkin	$q_e = A \cdot \ln(B \cdot C_e)$	$q_e = A \cdot \ln C_e + A \cdot \ln B$

q_e : cantidad de P adsorbido/g muestra (mg P/g suelo); C_e : Concentración en equilibrio / (ppm); q_0 : capacidad máxima de adsorción (mg P/g suelo); K_F : constante de equilibrio

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis de textura y porcentaje de materia orgánica y carbono orgánico de los suelos de cultivo se muestran en la Tabla 2.

De acuerdo a la Tabla 2, la textura del suelo de Yucumo-Beni (M4) es del tipo arenoso la cual se relaciona con la presencia de cuarzo. Por otro lado, hay presencia de materia orgánica en un 1,37 %. En el caso de los suelos de cultivo de Palos Blancos (MC), (MG) y (MN), los resultados indican que la textura del suelo es arcillosa la cual representa un 57,6% en promedio. Esto se asocia a la presencia de algún material arcilloso del tipo silico-aluminato identificado por DRX. El porcentaje de materia orgánica es del 1,3% la cual se asocia a la mayor presencia de cuarzo en las muestras de acuerdo a los resultados de DRX. La medida de los resultados del pH en cada uno de los suelos de cultivo, se muestran a continuación en la Tabla 3.

Tabla 2. Resumen de los resultados de caracterización de los suelos de cultivo de: Yucumo-Beni y Palos Blanco- La Paz

Muestra	Técnica		Valor	Desviación estándar
Suelo (M4) Yucumo	Textura /(%)	arena	85,00	5,65
		limo	7,00	3,00
		arcilla	9,00	0,00
		clase textual	arenoso	
	Materia orgánica y carbono orgánico / (%)		1,37	0,01
	Area superficial (m²/g)		7,17	0,12
Suelo (MC)	Textura /(%)	arena	32	2,5
		limo	21	1,1
		arcilla	47	1,1
		clase textual	arcilloso	
	Materia orgánica y carbono orgánico / (%)		1,7	0,1
	Suelo (M)	Textura /(%)	arena	18
limo			27	1,1
arcilla			55	1,1
clase textual			arcilloso	
Materia orgánica y carbono orgánico / (%)		1,1	0,1	
Suelo (MN)		Textura / (%)	arena	13
	limo		16	1,1
	arcilla		71	1,1
	clase textual		arcilloso	
	Materia orgánica y carbono orgánico / (%)		1,2	0,1

Tabla 3. Resumen de los resultados de pH de los suelos de cultivo

MUESTRA	pH	Característica	Conductividad/ $\mu\text{S}/\text{cm}$
Yucumo-Beni (M4)	7,5	Neutro	-
MC	6,6	Neutro	45
MG	5,6	Ácido	42
MN	5,3	Ácido	20

Se puede observar que las muestras MG y MN son ácidas, esto se puede asociar a la acidez que poseen los frutos de guineo y en especial la naranja dado que el ácido cítrico es el componente principal presente en la fruta de naranja que, durante el fenómeno de putrefacción de la fruta, se deposita en los suelos haciendo que estos sean ácidos.

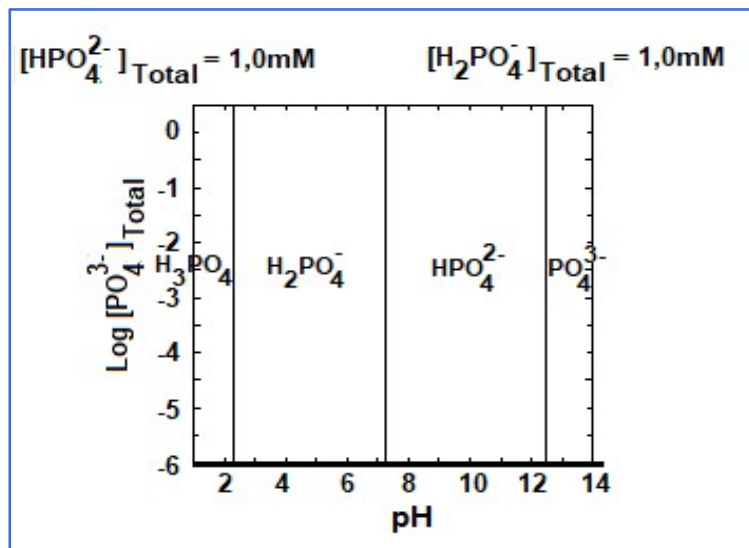
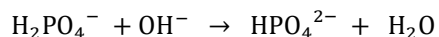


Figura 3. Diagrama de fases de las especies de fósforo presentes en solución respecto al pH calculado mediante el programa MEDUSA

En la Figura 3 se presenta el cálculo teórico realizado con el programa MEDUSA, donde se construye el diagrama de fases que evidencia la presencia de especies de fósforo en solución. Este análisis considera una concentración aproximada de 0,001 M de dichas especies en función del pH

Considerando la Figura 3, la muestra de suelo de cacao (MC) presenta un pH cercano a 7. En este intervalo se observa la coexistencia de varias especies fosfatadas; sin embargo, en la muestra de cacao (MC) predomina la especie H_2PO_4^- a un pH de 6,6, lo cual coincide con lo previsto en el diagrama de fases teórico del fósforo. En contraste, en la muestra identificada como (M4) se evidencia una transformación de la especie H_2PO_4^- hacia HPO_4^{2-} , de acuerdo con la reacción química correspondiente. En resumen, el suelo de cacao mantiene mayoritariamente fosfato monobásico (H_2PO_4^-) en condiciones ligeramente ácidas, mientras que en la otra muestra (M4) se observa el cambio hacia fosfato dibásico (HPO_4^{2-}) conforme varía el pH.



Esto se debe al pH de la muestra (M4) en un valor de 7,5, siendo el medio básico lo cual favorece la anterior reacción química. En el caso de los suelos; MC de cacao y la de Yucumo: el valor entre 6,6 y 7,5 se puede considerar con una tendencia neutra. Los resultados de difracción de rayos X, se puede resumir en la Tabla 4.

Tabla 4. Resumen de los resultados de difracción de rayos X de los suelos de cultivo

Muestra	% Fase principal	Señal principal 2 theta / °	Otras fases presentes
(M4)	SiO ₂ / 95%	26,7	Moscovita KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) / 5%
(MC)	SiO ₂ / 80%	26,6	
(MG)	SiO ₂ / 80%	26,6	NaCa ₂ (AlSi ₂ O ₁₀)(OH)/1
(MN)	SiO ₂ / 80%	26,6	0% Fe ₂ O ₃ /10%

En la muestra de Yucumo (M4), el pico principal a 26,7° se atribuye al dióxido de silicio cristalino (ASTM 01-085-0797), con una proporción del 95%. Además, se observa un pico menor a 27,5°, correspondiente a la fase tipo moscovita, una arcilla con fórmula KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH), que representa el 5% (ASTM 00-034-0180). En las muestras de Palos Blancos (MC), (MG) y (MN), el pico máximo a 26,6° se asigna igualmente al dióxido de silicio cristalino (ASTM 01-085-0797), con un 80%. Asimismo, aparece un pico pequeño a 6,1°, asociado a la fase montmorillonita, una arcilla con fórmula NaCa₂(AlSi₂O₁₀)(OH), que representa el 10% (ASTM 00-034-0180). Por otra parte, los picos a 19,7° y 34,9° corresponden a señales del óxido férrico Fe₂O₃ (ASTM 01-079-1741). Finalmente, las muestras de Palos Blancos presentan una tonalidad naranja, atribuida a la presencia de óxido férrico. Los resultados de la adsorción de fósforo en función del tiempo se muestran en la Figura 4.

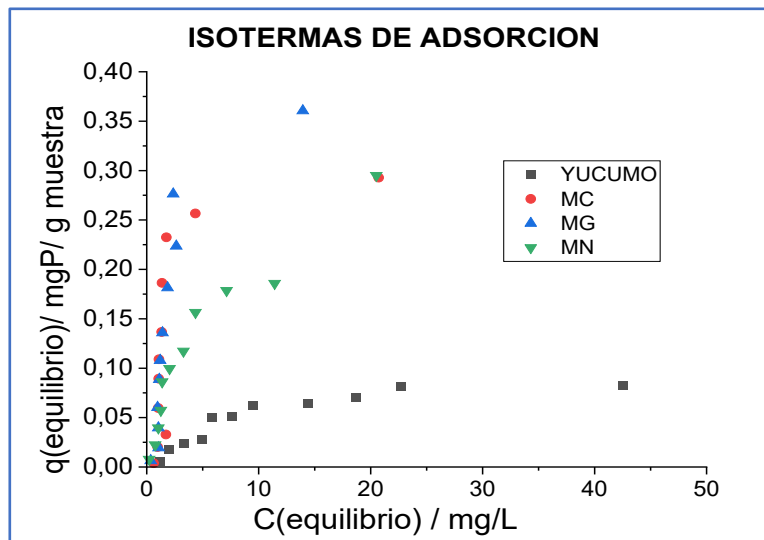


Figura 4. Isotermas de adsorción de fósforo de las muestras de suelo de cultivo

Se puede observar que las isothermas de la Figura 4, obedecen a un modelo del tipo L; según la clasificación de Giles, que es el tipo más común de las isothermas en fase líquida^{21 22}. Por otro lado, se observa que un incremento de la concentración en equilibrio especialmente de las muestras de suelo de cultivo de Palos Blancos, sugiere un incremento de la adsorción de fósforo en estas muestras (MC, MG, MN) en comparación de la muestra de suelo de Yucumo (M4). Esto puede relacionarse con una fuerte atracción intermolecular entre las moléculas de adsorbato, en este caso el fósforo en fase acuosa como fosfato diácido y la estructura del suelo, que contiene la fase de Fe_2O_3 por los resultados de DRX, donde los sitios de adsorción Fe/óxidos de aluminio, se asocian con este proceso¹⁸.

El análisis de regresión lineal se realizó con el programa SIGMAPLOT 12.0. Los resultados del comportamiento de adsorción, se muestran en la Tabla 5:

Tabla 5. Resultados de análisis de regresión lineal a diferentes modelos de la muestra de suelo

Muestra	Modelo	Ecuación	$y = mx + b$	Regresión lineal
Suelo Yucumo	Freundlich	$q_e = K_F \cdot C_e^{\frac{1}{n}}$	$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F$	$m = 0,7243$ $b = -2,0432$ $r = 0,9577$
	Langmuir	$q_e = \frac{q_o \cdot K_F \cdot C_e}{1 + K_F \cdot C_e}$	$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_o \cdot K_F} \left(\frac{1}{C_e} \right) + \frac{1}{q_o}$	$m = 99,504$ $b = 13,013$ $r = 0,9601$
	Temkin	$q_e = A \cdot \ln(B \cdot C_e)$	$q_e = A \cdot \ln C_e + A \cdot \ln B$	$m = 7,5243$ $b = -2,2064$ $r = 0,8282$
Suelo MC	Freundlich	$q_e = K_F \cdot C_e^{\frac{1}{n}}$	$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F$	$m = 0,8635$ $b = -1,3544$ $r = 0,443$
	Langmuir	$q_e = \frac{q_o \cdot K_F \cdot C_e}{1 + K_F \cdot C_e}$	$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_o \cdot K_F} \left(\frac{1}{C_e} \right) + \frac{1}{q_o}$	$m = 23,939$ $b = 0,0956$ $r = 0,9458$
	Temkin	$q_e = A \cdot \ln(B \cdot C_e)$	$q_e = A \cdot \ln C_e + A \cdot \ln B$	$m = 0,0808$ $b = 0,0904$ $r = 0,6829$
Suelo MG	Freundlich	$q_e = K_F \cdot C_e^{\frac{1}{n}}$	$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F$	$m = 1,104$ $b = -1,281$ $r = 0,82$
	Langmuir	$q_e = \frac{q_o \cdot K_F \cdot C_e}{1 + K_F \cdot C_e}$	$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_o \cdot K_F} \left(\frac{1}{C_e} \right) + \frac{1}{q_o}$	$m = 18,933$ $b = 0,8144$ $r = 0,943$
	Temkin	$q_e = A \cdot \ln(B \cdot C_e)$	$q_e = A \cdot \ln C_e + A \cdot \ln B$	$m = 0,1148$ $b = 0,0866$ $r = 0,916$
Suelo MN	Freundlich	$q_e = K_F \cdot C_e^{\frac{1}{n}}$	$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F$	$m = 0,8746$ $b = -0,444$ $r = 0,895$
	Langmuir	$q_e = \frac{q_o \cdot K_F \cdot C_e}{1 + K_F \cdot C_e}$	$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_o \cdot K_F} \left(\frac{1}{C_e} \right) + \frac{1}{q_o}$	$m = 28,357$ $b = 0,0437$ $r = 0,9977$
	Temkin	$q_e = A \cdot \ln(B \cdot C_e)$	$q_e = A \cdot \ln C_e + A \cdot \ln B$	$m = 0,0773$ $b = 0,0311$ $r = 0,979$

q_e : cantidad de P adsorbido/g muestra (mg P/g suelo); C_e : Concentración en equilibrio / (ppm); q_o : capacidad máxima de adsorción (mg P/g suelo); K_F : constante de equilibrio

De acuerdo a los resultados de la Tabla 5, el comportamiento de la adsorción de fósforo obedece a un modelo del tipo Langmuir, cuyo factor de correlación se aproxima a uno. Esto es debido a que el número de centros activos disponibles en la monocapa para la adsorción de nuevas moléculas es cada vez menor. Esto se produce hasta alcanzar una meseta cuando el sólido ya no puede retener más adsorbato.

A partir de estos resultados, se pudo calcular los valores de la capacidad máxima de adsorción (q_o), la constante de equilibrio (K_F , y el valor de ΔG , la cual se muestra en la Tabla 6.

Los resultados indican que la capacidad máxima de adsorción del suelo de cultivo de Yucumo (M4) cuyo valor es de 0,0768 mgP/g suelo, resulta ser menor con respecto a los suelos de Palos Blancos (MC), (MG) y (MN), lo cual se

sugiere una relación de interacción del tipo London, una fuerza intermolecular débil, con formación de un dipolo instantáneo debido a la acumulación temporal de electrones a un lado del átomo lo que induce un dipolo en el átomo vecino²³ en este caso de la especie formada HPO_4^{2-} a partir de la presencia del H_2PO_4^- en medio básico ($\text{pH}=7,5$) en solución de acuerdo a los resultados del pH y el diagrama de fases del fósforo de la Figura 3 con la presencia de la fase cristalina definida del tipo SiO_2 (95%), identificada por DRX.

Tabla 6. Valores de q_0 , K_F y ΔG a distintos tipos de suelo de cultivo. Donde;

Muestra	Ecuación Linealizada $y = mx + b$	q_0 / (mgMg ²⁺ /g suelo)	K_F	ΔG adsorción KJ/mol
Yucumo (M4)	$\frac{1}{q_e} = 99,5 \left(\frac{1}{C_e} \right) + 13,01$	0,0768	7,67	-5,05
(MC)	$\frac{1}{q_e} = 23,94 \left(\frac{1}{C_e} \right) + 0,096$	11,06	2,288	-2,05
(MG)	$\frac{1}{q_e} = 18,93 \left(\frac{1}{C_e} \right) + 0,814$	1,228	15,42	-6,78
(MN)	$\frac{1}{q_e} = 28,357 \left(\frac{1}{C_e} \right) + 0,0437$	22,88	1,24	-0,53

q_e : cantidad de P adsorbido/g muestra (mg P/g suelo); q_0 : capacidad máxima de adsorción (mg P/g suelo);
 K_F : constante de equilibrio

En el caso de las muestras de Palos Blancos (MC), (MG) y (MN), la muestra (MN) posee una mayor capacidad de adsorción máxima de 22,88 mgP/ g suelo, lo cual se asocia a la acidez que poseen los frutos de guineo y en especial la naranja dado que el ácido cítrico es su composición principal presente en la fruta de naranja que, durante el fenómeno de putrefacción de la fruta, esta se deposita en los suelos haciendo que estos se vuelvan ácidos favoreciendo la formación de la especie H_2PO_4^- de acuerdo al diagrama de fases de la Figura 3.

Los resultados de la adsorción de fósforo por gramo de suelo de cultivo, permiten aplicarse en un futuro a las plantaciones de: frejol, tomate, lechuga, etc. de un suelo de cultivo, donde la capacidad máxima de adsorción permitirá calcular la cantidad de fósforo que deba adicionarse. El valor de ΔG de adsorción indica valores negativos lo cual permite la espontaneidad del proceso de adsorción.

Asimismo, los valores de la capacidad de adsorción de las muestras (MC), (MG) y (MN) obtenidos, se encuentran fuera del rango superior a los encontrados y reportados por: Yang et al. (2019) cuyo valor de la capacidad máxima de adsorción de fosforo en suelos negros se encuentra entre 0,061-0,0805 mgP/g suelo negro^[18] y de los resultados de Diaz Poveda et al en suelos de plantación de café en un valor entre 0,026-3,3 mg P /g suelo de café^[24]. Estos resultados de capacidad de adsorción de fosforo en suelos de cultivo de palos blancos, se relacionan con la presencia de fase arcillosas del tipo montmorillonita y la fase oxido férrico Fe_2O_3 superficial identificadas por DRX y de la acidez del suelo de acuerdo a los resultados del pH, la cual es característica para suelos ácidos tropicales, lo que sugiere un comportamiento químico similar de los compuestos férricos y silíceos en las condiciones locales. En el caso del suelo de Yucumo, el valor obtenido de 0,0768 mgP /g suelo, está dentro del rango que indican Yang et al y Diaz Poveda et al^[24], la cual se asocia con la presencia de la fase no arcillosa del tipo moscovita.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se llegan a las siguientes conclusiones:

Las isotermas de adsorción, obedecen a un modelo del tipo L; según la clasificación de Giles, que es el tipo más común de las isotermas en fase líquida. Por otro lado, se puede observar un incremento de la concentración en equilibrio especialmente de las muestras de suelo de cultivo de Palos Blancos lo que sugiere un incremento de la adsorción de fósforo en estas muestras (MC, MG, MN) en comparación de la muestra de suelo de Yucumo (M4). Esto podría relacionarse con una fuerte atracción intermolecular entre las moléculas de adsorbato, en este caso el fósforo en fase acuosa como fosfato diácido y la estructura del suelo, que, en su mayoría, contiene la fase de Fe_2O_3 según los resultados de DRX.

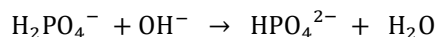
El comportamiento de la adsorción de fósforo obedece a un modelo del tipo Langmuir, cuyo factor de correlación se aproxima a uno. Esto es debido a que el número de centros activos disponibles en la monocapa para la adsorción de



nuevas moléculas es cada vez menor. Esto se produce hasta alcanzar una meseta cuando el sólido ya no puede retener más adsorbato.

La textura del suelo de Yucumo-Beni (M4) es del tipo arenoso la cual se relaciona con la presencia de cuarzo SiO_2 en un 95%. Por otro lado, hay presencia de materia orgánica en un 1,37 %. En el caso de los suelos de cultivo de Palos Blancos (MC), (MG) y (MN), los resultados indican que la textura del suelo es arcillosa la cual representa un 57,6% en promedio. Esto se asocia a la presencia de algún material arcilloso del tipo silico-aluminato identificado por DRX.

En el caso de la muestra (M4), hay una transformación de la especie H_2PO_4^- hacia HPO_4^{2-} , de acuerdo a la siguiente reacción química:



Esto se debe al pH de la muestra (M4) en un valor de 7,5, siendo el medio básico lo cual favorece la anterior reacción química.

La capacidad máxima de adsorción del suelo de cultivo de Yucumo (M4) cuyo valor es de 0,0768 mgP/g suelo, resulta ser menor con respecto a los suelos de Palos Blancos (MC), (MG) y (MN), lo cual se sugiere una relación de interacción del tipo London de la especie formada HPO_4^{2-} a partir de la presencia del H_2PO_4^- en medio básico (pH=7,5) en solución de acuerdo a los resultados del pH y el diagrama de fases del fósforo con la presencia de la fase cristalina definida del tipo SiO_2 (95%), identificada por DRX.

En el caso de las muestras de Palos Blancos (MC), (MG) y (MN), la muestra (MN) posee una mayor capacidad de adsorción máxima de 22,88 mgP/ g suelo, lo cual se asocia a la acidez que poseen los frutos de guineo y en especial la naranja dado que el ácido cítrico es su composición principal presente en la fruta de naranja que, durante el fenómeno de putrefacción de la fruta, esta se deposita en los suelos haciendo que estos se vuelvan ácidos favoreciendo la formación de la especie H_2PO_4^- de acuerdo al diagrama de fases del fósforo.

Los resultados de la adsorbido de los mg de fósforo por cada gramo del suelo de cultivo, permiten aplicarse en un futuro a las plantaciones de: frejol, tomate, lechuga, etc. de un suelo de cultivo, donde la capacidad máxima de adsorción permitirá calcular la cantidad de fósforo que deba adicionarse.

El proceso de adsorción de fósforo en los suelos estudiados se ajusta al modelo de Langmuir, indicando una monocapa con alta correlación lineal.

Los suelos de Palos Blancos presentaron mayor capacidad de adsorción debido a su acidez y composición arcillosa rica en Fe_2O_3 .

El valor negativo de ΔG de adsorción confirma la espontaneidad del proceso.

Estos resultados pueden contribuir al diseño de estrategias de fertilización fosfatada en cultivos agrícolas del altiplano y trópico boliviano.

REFERENCIAS

- ¹ A. Bernal-Fundora, A. Hernández-Jiménez, P. González-Cañizares, A. Cabrera-Rodríguez, *Cult. Trop.*, 2019, **40**, 35
- ² M. Ross, *Rev. Pal.*, 2004, **25**, 1
- ³ Gliessman SR., *Agroecology: Ecological Processes en sustainable agriculture*, Press, Lewis Publishers, USA 2000
- ⁴ A. A. Szogi, P. J. Bauer, M. B. Vanotti. 2012. *J. Soil Sed.*, 2012 **12**, 334
- ⁵ N. C. Brady, R.R. Weil, *Elements of the Nature and Properties of Soils*, Prentice Hall, Inc. New Jersey, USA. 2009
- ⁶ B. L. Turner, E. Frossard, A. Oberson. Enhancing phosphorus availability in low-fertility soils. In: Uphoff, N. (ed). *Biological Aproaches to Sustainable Soil Systems*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA 2006
- ⁷ T. I. Hernández-Leal, G. Carrión, G. Heredia. 2011. *Agr.*, 2011 **45**, 881
- ⁸ E. Afif, (2005, july) *Dinámica del fósforo en suelos calcáreos de áreas mediterráneas: trabajo experimental. Servicio de publicaciones de la Universidad de Oviedo. Oviedo, España.*
- ⁹ C. H. Giles, David Smith, Alan Huitson, *J. Col. Int. Sci.*, 1974, **47**, 775
- ¹⁰ H. S. Y. Akrawi, M. A. Al-Obaidi, Ch. H. Abdulrahman, *Earth Environ. Sci.*, 2021 **761**



- ¹¹ F. Prieto García, A. Gordillo Martínez, *S.M.C.T.S.V.* 2006 **9**
- ¹² S. Hussain, *Pol. J. Environ. Stud.*, 2016, **25**, 1947
- ¹³ M. S. U. Rehman, *Chem. Eng. J.*, 2013 **228** 54
- ¹⁴ G. Diaz, F. Sanchez, L. Tarquino, G. Vasconez, *CyT*, 2009 **3** 1
- ¹⁵ J. Ippolito, D. Tarkalson, G. Lehrs, *Soil Sci.*, 2011 **176** 136
- ¹⁶ V. Choque Flores, H. Castañeta, C. Ajpi, M. Blanco, *Rev. Bol. Quím.*, 2023. **40** 61 <https://doi.org/10.34098/2078-3949.40.3.1>
- ¹⁷ . Patiño, W. Barragan, O. Vergara, L. Maza, *Rev. Colomb. Cienc. Anim.*, 2012, **4(2)** 473
- ¹⁸ X. Yang, X. Chen, X. Yang, *Soil & Tillage Res.*, 2019, **187**, 85. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.016>
- ¹⁹ Bouyoucos, G.L. *Soil Sci.*, 1936, **42 (3)** 225
- ²⁰ A.J. Walkley, I.A. Black, *Soil Sci.*, 1934, **37** 29
- ²¹ C. H. Giles, *J. Chem.Soc.* 1960, **59**
- ²² F. Rouquerol, *Adsorption by Powders and Porous Solids*. Vol. 19, San Diego, Academic Press. **1999**
- ²³ M. J. Lopez, Lopez, **2017**, Tesis de grado, Mexico, “Enlaces quimicos, fuerzas intermoleculares y su relación con ciencias de la tierra”.
- ²⁴ V. Díaz Poveda, S. Sadeghian Khalajabadi, *CENICAFE*, 2018, **69 (2)**, 7