



Adsorción y Disponibilidad de Fósforo de Dos Fuentes Fosfatadas en un Vertisol del Norte de México Phosphorus Adsorption and Availability from Two Phosphate Sources in Vertisol in Northern Mexico

Lamberto Zúñiga-Estrada¹ , José de Jesús Martínez-Hernández² ,
María de los Ángeles Sariñana-Navarrete³ , Alain Buendía-García⁴ ,
Rafael Zuñiga-Valenzuela⁵ , Gerardo Zapata-Sifuentes⁴ y Pablo Preciado-Rangel⁶

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Carr. Tampico-Mante km 55, Villa Cuahtémoc. 89610 Altamira Tamaulipas, México; (L.Z.E.).

² Colegio de Postgraduados. Campus San Luis Potosí. C de Iturbide 73, San Agustín. 78600 Salinas de Hidalgo, S.L.P, México; (J.J.M.H.).

³ Universidad Tecnológica de Rodeo. Carretera Panamericana, km 159.4, Col. ETA. 35760 Rodeo, Durango, México; (M.A.S.N.).

⁴ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Periférico Raúl López Sánchez s/n, Colonia Valle Verde. 27054 Torreón, Coahuila, México; (A.B.G.), (G.Z.S.).

⁵ Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia. Carretera Gómez Palacio-Tlahualilo km 32, Ejido Venecia. 35110, Gómez Palacio, Durango, México; (R.Z.V.).

⁶ Instituto Tecnológico de Torreón, Carretera Torreón-San Pedro km 7.5, Ejido Ana. 27170 Torreón, Coahuila, México; (P.P.R.).

[‡] Autor para correspondencia: ppreciador@yahoo.com.mx

RESUMEN

El fósforo (P) es un nutriente esencial para el desarrollo de las plantas, su estudio en el suelo es fundamental para optimizar el manejo de fertilizantes fosfatados en función de las características específicas del suelo y los sistemas de producción. El objetivo de este estudio fue determinar la capacidad máxima de adsorción de P en un Vertisol y analizar el comportamiento de dos fertilizantes fosfatados. Mediante la isoterma de Langmuir, se determinó que la capacidad máxima de adsorción de P en el suelo fue de 1080 mg kg^{-1} con superfosfato triple de calcio (SFT) y 1030 mg kg^{-1} con ácido fosfórico (H_3PO_4). Del P aplicado como SFT, el 30% se encontraba como fosfatos de calcio (P-Ca) y el 28% como P soluble, mientras que con H_3PO_4 estos porcentajes fueron del 40 y 31%, respectivamente. Las dos fuentes de P mostraron un comportamiento diferenciado al ser aplicadas al suelo. El P proveniente del H_3PO_4 se liberó rápidamente, alcanzando concentraciones superiores a más del doble que las obtenidas por el SFT; sin embargo, a las 24 horas de la aplicación, independientemente de la fuente o dosis, el 94% del P aplicado fue adsorbido, indicando la alta capacidad de adsorción del suelo vertisol, el H_3PO_4 presentó mayor disponibilidad inicial de P, lo que podría ser ventajoso en sistemas intensivos de producción. En contraste, el SFT presenta una liberación más gradual, lo que lo convierte en una opción viable para fertilización de fondo. La capacidad de adsorción y la disponibilidad de fósforo en el suelo determina la selección del fertilizante fosfatado más adecuado de acuerdo al sistema de producción.

Palabras clave: fertilizantes fosfatados, isoterma de langmuir, retención de fósforo.

SUMMARY

Phosphorus (P) is an essential nutrient for plant development; its study in soil is fundamental to optimize phosphate fertilizer management based on the specific soil characteristics and production systems. The present study aims to determine the maximum P adsorption capacity in Vertisol and evaluate the behavior of two phosphate fertilizers. Using Langmuir isotherm, the maximum P adsorption capacity in soil was 1080 mg kg^{-1} with calcium triple superphosphate (SFT) and 1030 mg kg^{-1} with phosphoric acid (H_3PO_4). Of the P applied as SFT, 30% was present as P-Ca and 28% as soluble P, while with H_3PO_4 these percentages were 40 and 31%, respectively.



Cita recomendada:

Zúñiga-Estrada, L., Martínez-Hernández, J. J., Sariñana-Navarrete, M. A., Buendía-García, A., Zuñiga-Valenzuela, R., Zapata-Sifuentes, G., & Preciado-Rangel, P. (2025). Adsorción y Disponibilidad de Fósforo de Dos Fuentes Fosfatadas en un Vertisol del Norte de México. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-8. e2152. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2152>

Recibido: 31 de octubre de 2024.

Aceptado: 5 de febrero de 2025.

Artículo. Volumen 43.

Junio de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Francisco H. Ruiz Espinoza

Editor Técnico:

Dr. Gerardo Cruz Flores



Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

The two P sources showed differentiated behavior when applied to soil. The P derived from H_3PO_4 was released quickly, reaching concentrations more than double of those obtained from SFT; however, at 24 hours post-application, regardless of the source or dose, 94% of the applied P was adsorbed, indicating the high adsorption capacity of the Vertisol soil. H_3PO_4 showed a greater initial availability of P, which could be advantageous in intensive production systems. In contrast, SFT shows a more gradual release, making it a viable option for base fertilization. Phosphorus adsorption capacity and availability in soil determine the selection of the most suitable phosphate fertilizer according to the production system.

Index words: phosphate fertilizers, langmuir isotherm, phosphorus retention.

INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es un nutriente esencial para el crecimiento y productividad de los cultivos (Blackwell, Darch y Haslam, 2019). Sin embargo, en la mayoría de los suelos, sólo una pequeña fracción del P mineral es asimilable por la planta (van Doorn et al., 2024). Esto hace necesario aplicar fuentes fosfatadas para mantener concentraciones óptimas de P en la solución del suelo y evitar que se convierta en un factor limitante al crecimiento y productividad de las plantas cultivadas. Se estima que una concentración adecuada de P en la solución del suelo, para la mayoría de los cultivos, varía entre 5 y 20 mg kg⁻¹ (McDowell, Pletnyakov y Haygarth, 2024).

La forma más rápida para incrementar la concentración de P en la solución del suelo es suministrarlo mediante el uso de fertilizantes fosfatados; sin embargo, el P soluble tiende a ser adsorbido por las partículas del suelo debido a diferentes procesos fisicoquímicos, lo que reduce su disponibilidad (Zhao, Li y Yang, 2021; Álvarez y Noellemyer, 2022). En suelos ácidos el P inorgánico se precipita como fosfato de aluminio (P-Al), de hierro (P-Fe) o es adsorbido en las superficies de óxidos de Fe, de Al y en minerales arcillosos (Celi, Prati, Magnacca, Santoro y Martin, 2020). En suelos neutros o calcáreos el P se precipita como fosfatos de calcio (Ca-P) o es adsorbido en la superficie de las arcillas y en el carbonato de calcio ($CaCO_3$) (Gai et al., 2024).

En algunas zonas agrícolas es común el uso del superfosfato triple de calcio (SFT) ($Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$), fertilizante que, al disolverse con la humedad edáfica, genera ácido fosfórico (H_3PO_4) disminuyendo el pH del entorno inmediato, facilitando la solubilización de compuestos de Fe^{3+} y Al^{3+} , que luego reaccionan con el P, contribuyendo a su adsorción (Penn y Camberato, 2019). El pH del suelo influye en la transformación del H_3PO_4 en $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} y PO_4^{3-} con un incremento en el pH y en las primeras semanas, después de su aplicación, se forman fosfatos dicálcicos dihidratados ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$); entre 3 y 5 meses empieza a precipitarse como octofosfatos de calcio ($Ca_4H(PO_4)_3 \cdot 2.5H_2O$) y después de 8 meses se forman eventualmente minerales de apatita ($Ca_5(PO_4)_3OH$) (Havlin, Beaton, Tisdale y Nelson, 2017). La liberación gradual de P de estos compuestos hacia la solución del suelo, determina la disponibilidad de P para las plantas. En suelos calcáreos, la adsorción de P puede ocurrir desde concentraciones en solución de 0.1 a 5 mg kg⁻¹, mientras que su precipitación como P-Ca tiene lugar en concentraciones de 400 y 600 mg kg⁻¹ (Zhou y Li, 2001). De hecho, las prácticas de manejo de fertilizantes influyen en las reacciones de adsorción y de precipitación, lo que afecta la distribución y disponibilidad del P en el suelo (Afif, Palencia y Oliveira, 2013). Para modelar la disminución de P en la solución, las isotermas de adsorción, como la de Langmuir, permiten relacionar la cantidad de P adsorbido con su concentración en equilibrio en la solución del suelo. Esto permite estimar las necesidades de fertilizante fosfatado en función de la capacidad máxima de adsorción del suelo. En suelos calcáreos de España se han reportan valores de máxima adsorción de P entre 150 a 2566 mg kg⁻¹ (López-Pineiro y Navarro, 1997), mientras que en suelos de Florida se pueden alcanzar valores hasta de 5556 mg kg⁻¹ (Zhou y Li, 2001).

Los vertisoles ocupan el 8.3% del territorio nacional y se consideran los suelos más productivos de México; sin embargo, presentan problemas de manejo en cuatro aspectos principales, a) mecanización; b) compactación, c) drenaje y d) fertilización (Torres-Guerrero, Gutiérrez, Ortiz y Gutiérrez, 2016). El estudio del comportamiento del fósforo en suelos Vertisols es particularmente relevante debido a su alta capacidad de adsorción del P, lo que afecta significativamente su disponibilidad para las plantas. En este contexto, este estudio tiene como objetivo determinar la capacidad máxima de adsorción de P en un suelo Vertisol y analizar el comportamiento de dos fertilizantes fosfatados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras de suelo se recolectaron en el área agrícola del campo experimental Las Huastecas del INIFAP, ubicado en Villa Cuauhtémoc, Altamira Tamaulipas, México (22° 34' 6" N, 98° 10' 5" O), el suelo se clasifica como un Vertisol. Las muestras de suelo recolectadas a una profundidad de 0-25 cm, fueron caracterizadas conforme a Norma

Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002). Se evaluaron las propiedades físicas y químicas iniciales del suelo, incluyendo textura (método de Bouyoucos); capacidad de campo (Olla de presión); punto de marchites permanente (Membrana de presión); pH en agua (suelo: solución 1:2); conductividad eléctrica (Pasta saturada); materia orgánica; CIC y cationes intercambiables (NH_4OAc 1 M a pH 7), fósforo disponible (Olsen); micro nutrientos extraídos en DTPA), carbonatos totales (Sokolovich, 1966); carbonatos activos (Loeppert, Hallmark y Koshy, 1984). Las propiedades iniciales del suelo se indican en el Cuadro 1.

Isotermas de Adsorción de Fosforo

Se evaluó la capacidad de adsorción de P del suelo mediante las siguientes determinaciones:

Adsorción máxima de P. Se tomaron muestras de 1 g de suelo, las cuales se colocaron en tubos de centrífuga de 50 mL. A cada tubo se le adicionaron 25 mL de una solución de CaCl_2 0.01 mol L⁻¹ con concentraciones de P de 0, 5, 10, 20, 40, 60, 80 y 100 mg kg⁻¹. Se utilizó SFT y H_3PO_4 como fuente de fósforo. Cada tratamiento de P se realizó por triplicado. Los tubos se agitaron durante 24 horas a temperatura ambiente. Posteriormente, se centrifugaron a 1800 rpm durante 10 minutos, el sobrenadante se filtró en una membrana de 0.45 µm (Nair et al., 1984). El fósforo se determinó por colorimetría mediante un espectrofotómetro a 882 nm, el color se desarrolló con una solución combinada de ácido ascórbico-molibdato de amonio. La cantidad de P adsorbida por el suelo se calculó por la diferencia entre la concentración de la solución inicial y la concentración de P en la solución en equilibrio con el suelo.

Cuadro 1. Propiedades físico-químicas del suelo utilizado en el estudio.
Table 1. Physicochemical properties of the soil used in the study.

Determinación	Valor
pH H ₂ O 1:2 (suelo: solución)	8.7
P-Olsen (mg kg ⁻¹)	10.4
CE (dS m ⁻¹)	1.3
Carbonatos totales (%)	6.9
Carbonatos activos (%)	0.6
Materia orgánica (%)	1.1
CIC (cmol (+) kg ⁻¹)	52.5
Cationes intercambiables (cmol (+) kg ⁻¹)	
K ⁺	0.72
Ca ²⁺	35.2
Mg ²⁺	4.0
Na ⁺	1.4
Micronutrientos (mg kg ⁻¹)	
Fe ²⁺	0.3
Zn ²⁺	5.5
Mn ²⁺	0.2
Cu ²⁺	1.2
Capacidad de campo (%)	42.6
Punto de marchites permanente (%)	20.6
Clase textural	
Arena (%)	26.9
Limo (%)	23.0
Arcilla (%)	50.1

Los valores de adsorción se determinaron mediante la ecuación de Langmuir que en su forma lineal es:

$$C(x/m)^{-1} = 1/kb + C/b \quad (1)$$

Donde: C = concentración de P en la solución en equilibrio con el suelo (mg mL^{-1}), x/m = P adsorbido sobre la superficie del suelo ($\mu\text{g g}^{-1}$ de suelo), b = cantidad máxima de P que puede ser adsorbido sobre la superficie ($\mu\text{g g}^{-1}$ de suelo), k = constante de energía de retención ($\text{mL } \mu\text{g}^{-1}$).

Fraccionamiento de P. En las muestras de suelo utilizadas en la determinación de la adsorción máxima de P y en las cuales parte del P aplicado a un gramo de suelo fue adsorbido, se determinaron las diferentes fracciones de P mediante el método de Petersen y Corey (1966); fosfatos solubles en agua (P-S) -(NH_4Cl 1 N); fosfatos ligados al aluminio (P-Al) - (NH_4F 0.5N pH 7.0); fosfatos ligados al hierro (P-Fe) - (NaOH 1 N); fosfatos ligados al Calcio (P-Ca) - (H_2SO_4 0.5 N).

Disponibilidad del P aplicado. Se colocaron 30 g de suelo en frascos de vidrio de 130 mL, después se aplicó por triplicado los tratamientos de 214, 275, 466, 847 y 1100 mg kg^{-1} de P proveniente del superfosfato triple de calcio, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (46% P_2O_5) y ácido fosfórico, H_3PO_4 (85% de pureza y densidad de 1.76 g mL^{-1}). La cantidad de P aplicado representó 20, 26, 44, 80 y 100%, respectivamente de la adsorción máxima de P por el suelo.

Se estudiaron 10 tratamientos derivados de un arreglo factorial 2×5 . El primer factor fue la fuente de P ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (46% P_2O_5) y H_3PO_4 (85% de pureza y densidad de 1.76 g mL^{-1}) y el segundo factor fueron las dosis de P aplicadas (214, 275, 466, 847 y 1100 mg kg^{-1}), las cuales fueron aplicadas en frascos de vidrio de 130 mL de capacidad que contenían 30 g de suelo. La cantidad de P aplicado representó 20, 26, 44, 80 y 100%, respectivamente de la adsorción máxima de P por el suelo. Cada tratamiento se replicó tres veces y se organizó bajo un diseño completamente al azar.

Las dosis del fertilizante fosfatado se aplicaron uniformemente en el suelo y se mezclaron para garantizar su distribución homogénea. Posteriormente se añadió agua a cada frasco hasta alcanzar la capacidad de campo, que se había determinado previamente en las muestras de suelo. Los frascos se colocaron en una incubadora, permaneciendo a 35°C durante 36 días; periódicamente se aplicó el volumen de agua necesario para mantener la humedad de suelo. Se realizaron cinco evaluaciones del P aprovechable con el método Olsen, a 1, 3, 9, 18, 27, 36 días después de la incubación.

Análisis Estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente utilizando software informático Statical Analysis System (SAS, 2011). Se utilizó un análisis de varianza, para evaluar la diferencia entre los tratamientos y las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Adsorción Máxima y Fraccionamiento de P

Las curvas de adsorción de P son fundamentales para entender su dinámica en el suelo, además permiten definir la estrategia más adecuada para la fertilización. En este estudio la adsorción de P por ambas fuentes fosfatadas mostró un buen ajuste a la ecuación de Langmuir con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.93^{**}$. El P adsorbido por el suelo fue 1080 y 1030 mg kg^{-1} para el SFT y H_3PO_4 , respectivamente (Cuadro 2). Estos valores indican que el P aplicado a través de los fertilizantes fosfatados no estará completamente disponible para las raíces de las plantas, lo anterior sugiere que su disponibilidad no depende únicamente de su concentración, sino de una serie de procesos fisicoquímicos del suelo (Muindi et al., 2015). Los valores de adsorción de P obtenidos en este estudio, son comparables con los reportados en vertisolos de España (López-Pineiro y Navarro, 1997); no obstante, la capacidad de adsorción es cuatro veces inferior a la observada en Vertisolos del sur de Florida (Zhou y Li, 2001), lo cual que puede deberse a diferencias en los minerales del suelo como caolinita, montmorillonita, illita y geotita, como fosfato de calcio, aluminio y fierro (Penn y Camberato, 2019).

El P adsorbido fue liberado con relativa facilidad, lo que sugiere que la energía de adsorción en el suelo es similar para ambas fuentes fosfatadas. Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Muindi et al. (2015), quienes reportaron que la liberación de P en suelos calcáreos está fuertemente influenciada por la mineralogía del suelo. En cuanto al P total aplicado, se adsorbió el 58% con SFT y el 71% con H_3PO_4 . Con el SFT, 30% del fósforo adsorbido estuvo ligado al calcio y el 28% fue P soluble, mientras que con H_3PO_4 estos porcentajes fueron 40% y 31%, respectivamente. Las fracciones de P-Al, P-Fe no se detectaron (datos no mostrados).

Cuadro 2. Parámetros de la adsorción de P derivados de la isoterma de Langmuir.**Table 2. Parameters of the adsorption of P derived from the Langmuir isotherm.**

Fuente	Ecuación de la isoterma de adsorción de P	R ²	Adsorción máxima de P de suelo	Energía de adsorción
			mg kg ⁻¹	mg P g ⁻¹
SFT	Y = 13.137 + 0.928 (C)	0.93**	1080	0.07
H ₃ PO ₄	Y = 14.539 + 0.974 (C)	0.93**	1030	0.07

**altamente significativo ($\alpha \leq 0.01$); C = concentración de P mg mL⁻¹ en equilibrio.

**Highly significant ($\alpha \leq 0.01$); C = equilibrium P concentration in mg mL⁻¹.

Disponibilidad del P Aplicado como Fertilizante

La disponibilidad del P en el estudio de incubación, fue significativamente afectada por la fuente, dosis aplicada y el tiempo de incubación (Figura 1). Hasta el noveno día posterior a la aplicación, los valores de P disponible en él fueron superiores cuando se utilizó H₃PO₄, con respecto a los del SFT, lo que indica una mayor disponibilidad de P en la solución del suelo con el uso del H₃PO₄. Aunque la disponibilidad de P aumentó con la dosis aplicada, las diferencias entre las dosis solo fueron significativas hasta el tercer día del estudio de incubación. A medida que el H₃PO₄ interactuó más tiempo con el suelo, su disponibilidad disminuyó progresivamente, reduciendo las diferencias inicialmente observadas entre ambas fuentes de P. Como se muestra en la Figura 1, la disponibilidad de P en el suelo se estabilizó durante los últimos 18 días del experimento, alcanzando niveles comparables tanto para el SFT como para el ácido fosfórico.

La mayor disponibilidad del P en la solución del suelo del H₃PO₄ y la liberación lenta de P por el SFT, confirma las limitaciones en la disponibilidad de P asociada al manejo tradicional de la fertilización fosfatada. El SFT, generalmente es aplicado antes del establecimiento de los cultivos, como fertilización de fondo, mientras que el H₃PO₄ se utiliza en sistemas de producción intensiva, en dosis bajas y con alta frecuencia como es la fertirrigación (Chouki, Naciri y Oukarroum, 2024).

Mengel y Kirkby (2001), establecen que para mantener en la solución del suelo una concentración de P de 0.3 mg L⁻¹, se requieren aplicaciones elevadas de SFT; dicha concentración en caso fue observada después de los 18 días y se mantuvo hasta el final del experimento, tras la aplicación de 847 y 1100 mg kg⁻¹, de P, equivalentes a 2.5 y 3.3 Mg ha⁻¹ de SFT, estos resultados resaltan la necesidad de realizar estudios adicionales sobre el periodo en el que el suelo puede mantener una concentración adecuada de P para nutrir adecuadamente a los cultivos.

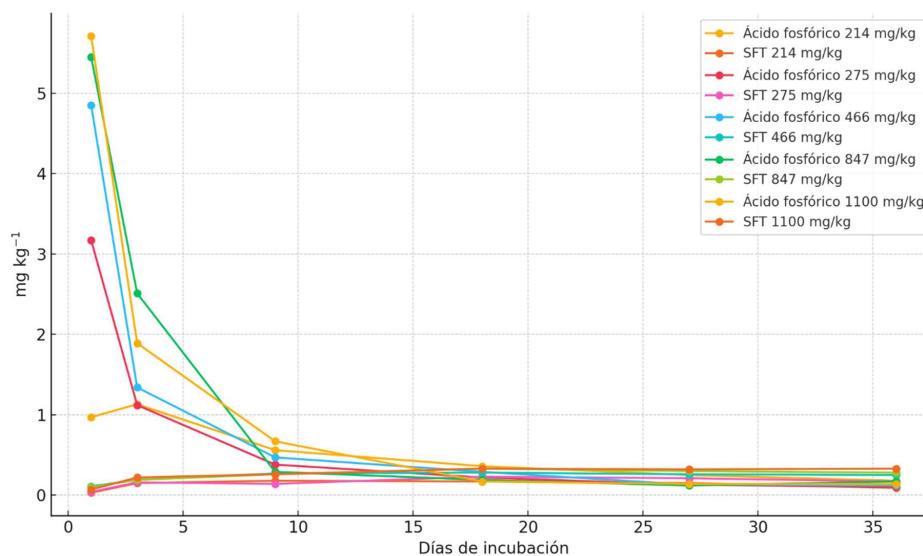


Figura 1. Disponibilidad de P-Olsen aplicado a un Vertisol mediante dos fuentes de P.
Figure 1. Availability of P-Olsen applied to a Vertisol using two sources of P.

Por otra parte, de acuerdo a los modelos de regresión generados (Cuadro 3), la disponibilidad inicial de P en la solución del suelo tras la aplicación de H_3PO_4 supera la concentración crítica de 0.3 mg L⁻¹ desde el momento de la aplicación hasta los 16 días posteriores. Este intervalo sugiere que dicha duración puede ser utilizada para determinar la frecuencia de la aplicación de los fertilizantes en los sistemas intensivos de producción.

La alta frecuencia de riego en los sistemas de riego localizado, como el goteo y micro goteo, permiten reducir las dosis de P inyectadas en el sistema. Estudios previos en vertisols indican que una dosis de 40 mg L⁻¹ de P, es suficiente para alcanzar altos rendimientos en papa (Papadopoulos y Stylianou, 1991). Además, dado que el volumen de humedecimiento del suelo con este sistema de riego puede ser hasta 50% del volumen total del suelo, la cantidad de fertilizante se reduce en la misma proporción (Bar-Yosef, 1999). La combinación de ambas fuentes de P es conveniente debido a las diferencias en la liberación del P, ya que el SFT, lo libera de manera más lenta, lo cual es útil para aplicaciones de fondo, y el H_3PO_4 , al tener una rápida disponibilidad es ideal para cubrir las necesidades inmediatas de los cultivos. Lo anterior sugiere que para un manejo adecuado del P en suelos vertisolos, con sistemas de riego localizado, se requiere una fertilización inicial con materiales solubles, complementada con aplicaciones frecuentes de H_3PO_4 , para asegurar un suministro constante de P. El presente estudio resalta la importancia de seleccionar las fuentes adecuadas de P y ajustar la frecuencia de aplicación para mantener niveles adecuados de P en la solución del suelo, donde las raíces de la planta absorben este nutriente. Esto es particularmente relevante en áreas del suelo donde los emisores de riego no logran abastecer suficiente P, además para cultivos con un sistema radical poco desarrollado, la fertilización de fondo en banda permite asegurar una concentración de P adecuado de nutrientes a las plantas (Bar-Yosef, Sagiv y Markovitch, 1989). Es importante destacar que, independientemente de la fuente y dosis el 94% del P fue adsorbido por el suelo dentro de las primeras 24 h tras su aplicación. En el caso de las dosis más altas como la de 1100 mg de P kg⁻¹ de suelo, esto representó una adsorción equivalente a 3.3 toneladas de SFT en una capa arable de 0.25 m. Los resultados muestran que, después de la aplicación del H_3PO_4 , la cantidad de P disponible en la solución del suelo es más del doble que la cuantificada con el SFT (Cuadro 4). Esta diferencia en la disponibilidad sugiere que el H_3PO_4 es más eficiente en los sistemas de producción intensiva, mientras que el SFT es adecuado para sistemas de fertilización de fondo.

En ambas fuentes de P, el incremento de la dosis aplicada generó un aumento en la concentración de P disponible. Sin embargo, el comportamiento relativo de la disponibilidad de P fue diferente entre ambas fuentes. El H_3PO_4 mostró una disponibilidad promedio del 4.14% mientras que el SFT tuvo una disponibilidad del 1.88 por ciento.

Cuadro 3. Modelos de regresión y coeficientes de determinación ajustados al P-Olsen determinado durante el periodo de incubación utilizando el ácido fosfórico.

Table 3. Regression models and coefficients of determination adjusted to the P-Olsen determined during the incubation period using phosphoric acid.

Dosis de P	Ecuación de regresión	R ²
mg L ⁻¹		
214	$Y = 1.4266 X^{-0.5415}$	0.97
275	$Y = 2.6297 X^{-0.8191}$	0.98
468	$Y = 4.5696 X^{-1.0183}$	0.98
846	$Y = 5.3353 X^{-1.1147}$	0.93
1100	$Y = 7.4143 X^{-1.1881}$	0.97

X = dosis de P aplicado.
X = applied P dose.

Cuadro 4. Total, de fósforo y porcentaje recuperado, estimado en el estudio de incubación en un suelo Vertisol.
Table 4. Total phosphorus and percentage recovered, estimated in the incubation study in a Vertisol soil.

Dosis de P	Fuente de fósforo			
	H ₃ PO ₄	SFT		
mg kg ⁻¹	mg de P	%	mg de P	%
214	13.843	6.47	5.458	2.6
275	15.206	5.53	7.290	2.6
466	19.019	4.08	9.272	2.0
847	21.113	2.49	10.435	1.2
1100	23.14	2.10	11.029	1.0
Promedio	18.46	4.14	8.70	1.88

CONCLUSIONES

La isoterma de Langmuir describió adecuadamente el proceso de adsorción de P en suelos Vertisols. Las fuentes fosfatadas mostraron diferencias en la capacidad de adsorción de P, con valores de 1080 mg kg⁻¹ para el SFT y 1030 mg kg⁻¹ para el H₃PO₄. Del P aplicado como SFT 30% se encontró como P unido al Ca y 28% como P soluble, mientras que en el H₃PO₄ estos porcentajes fueron 40 y 31% respectivamente. El P proveniente del H₃PO₄ es inmediatamente disponible en concentraciones significativamente más altas que las del SFT. A las 24 horas de su aplicación el 94% del P fue adsorbido por el suelo, independientemente de la fuente o dosis utilizadas. El manejo eficiente del P en Vertisols se logra mediante una combinación de una aplicación inicial de SFT, complementada con aplicaciones frecuentes de H₃PO₄, lo que optimiza la disponibilidad del P para las plantas.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización e investigación: L.Z.E. y J.J.M.H. Validación y análisis formal: M.A.S.N. y J.A.T.R. Escritura, revisión, edición y visualización: L.Z.E. y P.P.R. Supervisión: G.Z.S. Adquisición de fondos: R.Z.V.

AGRADECIMIENTOS

No aplicable.

LITERATURA CITADA

- Afif, E., Palencia, P., & Oliveira, J. A. (2013). Aplicación de fuentes de fósforo al suelo en diferentes cortes de césped cultivado. *Agrociencia*, 47(6), 553-566.
- Álvarez, L., & Noellemeyer, E. (2022). Dinámica del fósforo con fertilizante líquido y granulado en suelos de la región semiárida pampeana. *Ciencia del Suelo*, 40(1), 38-48.
- Bar-Yosef, B. (1999). Advances in fertigation. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (pp. 1-77). San Diego, CA, USA: Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60968-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60968-7)
- Bar-Yosef, B., Sagiv, B., & Markovitch, T. (1989). Sweet corn response to surface and subsurface trickle phosphorus fertigation. *Agronomy Journal*, 81(3), 443-447.
- Blackwell, M. S. A., Darch, T., & Haslam, R. P. (2019). Phosphorus use efficiency and fertilizers: future opportunities for improvements. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering-FASE*, 6(4), 332-340. <https://doi.org/10.15302/j-fase-2019274>
- Chtouki, M., Naciri, R., & Oukarroum, A. (2024). A review on phosphorus drip fertigation in the Mediterranean region: Fundamentals, current situation, challenges, and perspectives. *Heliyon*, 10(3), e25543. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25543>
- Celi, L., Prati, M., Magnacca, G., Santoro, V., & Martin, M. (2020). Role of crystalline iron oxides on stabilization of inositol phosphates in soil. *Geoderma*, 374, 114442.
- Gai, S., Liu, B., Lan, Y., Han, L., Hu, Y., Dongye, G., ... & Yang, F. (2024). Artificial humic acid coated ferrihydrite strengthens the adsorption of phosphate and increases soil phosphate retention. *Science of The Total Environment*, 915, 169870.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (2017). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th Ed.). Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall.
- Loeppert, R. H., Hallmark, C. T., & Koshy, M. M. (1984). Routine procedure for rapid determination of soil carbonates. *Soil Science Society of America Journal*, 48(5), 1030-1033.
- López-Pineiro, A., & Navarro, A. G. (1997). Phosphate sorption in vertisols of southwestern Spain. *Soil science*, 162(1), 69-77.
- McDowell, R. W., Pletnyakov, P., & Haygarth, P. M. (2024). Phosphorus applications adjusted to optimal crop yields can help sustain global phosphorus reserves. *Nature Food*, 5(4), 332-339. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00952-9>
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2001). *Principles of Plant Nutrition*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-010-1009-2>
- Muindi, E. M., Mrema, J. P., Semu, E., Mtakwa, P. W., Gachene, C. K., & Njogu, M. K. (2015). Phosphorus adsorption and its relation with soil properties in acid soils of Western Kenya. *International Journal of Plant & Soil Science*, 4(3), 203-211.
- Nair, P. S., Logan, T. J., Sharpley, A. N., Sommers, L. E., Tabatabai, M. A., & Yuan, T. L. (1984). Interlaboratory comparison of a standardized phosphorus adsorption procedure. *Soil Science Society of America Journal*, 13(4), 591-595. <https://doi.org/10.2134/jeq1984.00472425001300040016x>
- NOM-021-SEMARNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana). (2002). Antes NOM-021-RECNAT- 2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. D. F.: SEGOB.
- Papadopoulos, I., & Stylianou, Y. (1991). Trickle irrigation of sunflower with municipal wastewater. *Agricultural Water Management*, 19(1), 67-75.
- Penn, C. J., & Camberato, J. J. (2019). A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture*, 9(6), 120. <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>
- Petersen, G. W., & Corey, R. B. (1966). A modified Chang and Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates. *Soil Science Society of America Journal*, 30(5), 563-565.
- SAS Institute (2011). *Statistical Analysis System SAS/STAT User's Guide. version 9.3*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Sokolovich, V. E. (1966). A new volumetric method of determining carbonates in soil and grounds. *Soil Science and Plant Nutrition*, 12(1), 33.
- Torres-Guerrero, C. A., Gutiérrez-Castorena, M. D. C., Ortiz-Solorio, C. A., & Gutiérrez-Castorena, E. V. (2016). Manejo agronómico de los Vertisoles en México: una revisión. *Terra Latinoamericana*, 34(4), 457-466.
- van Doorn, M., van Rotterdam, D., Ros, G., Koopmans, G. F., Smolders, E., & de Vries, W. (2024). The phosphorus saturation degree as a universal agronomic and environmental soil P test. *CritiCal reviews in environmental sCienCe and teChnology*, 54(5), 385-404. <https://doi.org/10.1080/10643389.2023.2240211>
- Zhao, Y., Li, Y., & Yang, F. (2021). Critical review on soil phosphorus migration and transformation under freezing-thawing cycles and typical regulatory measurements. *Science of the Total Environment*, 751, 141614.
- Zhou, M., & Li, Y. (2001). Phosphorus-sorption characteristics of calcareous soils and limestone from the southern Everglades and adjacent farmlands. *Soil Science Society of America Journal*, 65(5), 1404-1412.