

Nota científica

DINÁMICA DE LAS FRACCIONES DE FÓSFORO DEL SUELO POR APLICACIÓN DE DOSIS CRECIENTES DE GALLINAZA

Jimmy Walter Rasche Alvarez¹ , Enzo Iván Dacak Colmán¹ , Gustavo Adolfo Rolón Paredes¹ , Diego Augusto Fatecha Fois¹ , Ana Beatriz Candia-Díaz^{2,*} ,

¹ Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias, San Lorenzo, Paraguay.

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, Brasil.

RESUMEN

La aplicación de gallinaza mejora la disponibilidad de fósforo (P) en el suelo. Este estudio evaluó su efecto sobre las fracciones de P en un Ultisol franco arenoso mediante un experimento en invernadero con nueve dosis de gallinaza (0-14 Mg ha⁻¹) en un diseño completamente al azar. Tras 60 días de incubación, el fraccionamiento de P reveló incrementos en las fracciones lábil y moderadamente lábil, con aumentos de 3,2 mg kg⁻¹ y 1,57 mg kg⁻¹ por Mg aplicada, respectivamente. La gallinaza aumentó el P total, favoreciendo su disponibilidad a corto plazo, sin afectar el P residual ni el no lábil.

Palabras clave: fertilización orgánica, estiércol avícola, Ultisol franco arenoso

DYNAMICS OF SOIL PHOSPHORUS FRACTIONS IN RESPONSE TO INCREASING RATES OF CHICKEN MANURE

* Autor de contacto:
anacandia09@gmail.com

Recibido:
02-11-24

Recibido con revisiones:
14-03-25

Aceptado:
15-03-25

Este artículo está bajo
licencia internacional



La titularidad del derecho de
autor/a es de los/as Autores/as.

ABSTRACT

The application of chicken manure improves the availability of phosphorus (P) in the soil. This study evaluated its effect on P fractions in a sandy loam Ultisol with nine rates of chicken manure (0 - 14 Mg ha⁻¹) in a completely randomized design experiment under greenhouse conditions. After 60 days of incubation, P fractionation revealed 3.2 mg kg⁻¹ and 1.57 mg kg⁻¹ increases in the labile and moderately labile fractions per Mg of chicken manure applied, respectively. The application of chicken manure increased total P, favoring its availability in the short-term, without affecting residual or non-labile P.

Keywords: organic fertilization, poultry manure, sandy loam Ultisol

INTRODUCCIÓN

El suministro de fósforo (P) en cultivos extensivos generalmente se realiza mediante la aplicación de fertilizantes químicos o fosfatos solubles. Según un reporte, en 2022 el consumo global de fertilizantes fosforados fue de aproximadamente 45 millones de toneladas (IFA, 2022). No obstante, en las zonas hortícolas situadas en la región Oriental de Paraguay se acostumbra a emplear enmiendas orgánicas en combinación con fertilización química. La principal enmienda orgánica utilizada por los horticultores es la gallinaza (Salinas Godoy et al., 2013), que proviene de granjas avícolas destinadas a la producción de huevos y carne, ya que la mayor parte de las granjas avícolas se sitúan próximas a las mayores urbanizaciones, por lo tanto, se encuentra bien distribuidas en todos los departamentos del país (DCEA, 2023).

La incorporación de gallinaza en la práctica agrícola mejora la productividad y calidad nutricional de los cultivos, contribuyendo a la seguridad alimentaria y evitando la expansión agrícola, lo que conserva y previene la degradación del suelo (Casas Rodriguez, 2020). Asimismo, la fertilización con enmienda orgánica además de proporcionar P a las plantas, también aporta otros nutrientes, los que, a su vez, son liberados de forma gradual, ya que es necesario que la materia orgánica se mineralice para la liberación de estos (Oliveira et al., 2021). Dado que el empleo de las enmiendas orgánicas, como la gallinaza, puede tener un impacto directo en la química del P del suelo, alterando su concentración, distribución y transformación (Audette et al., 2016), se vuelve esencial comprender el comportamiento del P derivado de la aplicación de dichas enmiendas. Una de las maneras de conocer dicho comportamiento del P es mediante el uso de técnicas de fraccionamiento de fósforo. Estas técnicas permiten determinar la dinámica de la transformación del P, inclusive en diferentes ambientes de producción en función a las dosis aplicadas, formas de preparación del suelo, fuentes de fertilizantes o de enmiendas orgánicas, clase texturales del suelo, técnicas de fertilización, entre otras (Vázquez et al., 2011; Rheinheimer et al., 2019).

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de la aplicación de dosis crecientes de gallinaza sobre las fracciones de P, en un suelo Ultisol franco arenoso.

MATERIALES Y MÉTODOS

El suelo fue colectado a la profundidad de 0-20 cm en una finca de agricultura familiar ubicada en el distrito de Santa Rosa, Misiones (25°37'26,83"S, 57°29'13,90"O). Esta finca ha sido históricamente utilizada para cultivos de maíz (*Zea mays* L.) y sésamo (*Sesamum indicum* L.). El suelo predominante en la zona es clasificado como Paleudult ródico con textura superficial franco arenosa (López Gorostiaga y Lesme, 2024).

La caracterización química inicial presentó 5,2 de $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$; 4,0 g kg⁻¹ de materia orgánica, 4,9 mg kg⁻¹ de P extractable; calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y aluminio (Al) de 1,62; 0,58; 0,06 y 0,63 cmol_c kg⁻¹, respectivamente, con valor de capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 6,31 cmol_c kg⁻¹.

Posteriormente, el suelo colectado fue remitido al invernadero, donde fue secado al aire y tamizado en zaranda con malla de 2 mm. A continuación, fueron aplicados los distintos tratamientos con dosis de gallinaza en un diseño experimental completamente al azar, con nueve tratamientos (equivalentes a 0, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 y 14 Mg ha⁻¹ de gallinaza) y tres repeticiones.

La gallinaza provino de la producción de pollos parrilleros en una granja avícola ubicada en la ciudad de Itá, departamento Central. La misma contenía 1,24% de N; 2,51% de P; 1,60% de K; 5,2% de Ca, 0,63% de Mg y 0,37% de Na. Fue secada a sombra, tamizada en tamiz de 4 mm y almacenada en un recipiente por dos semanas para su posterior uso en la incubación de las muestras de suelo.

Fue realizada la mezcla homogénea de las dosis de gallinaza con 2 kg de suelo por unidad experimental, se colocaron en bolsas de polietileno cerradas con un orificio para facilitar el intercambio gaseoso con el ambiente externo. Las muestras de suelo con las dosis de gallinaza fueron incubadas por 60 días en el invernadero a temperatura ambiente de 30 ± 5 °C, manteniendo la humedad próxima al 80% de la capacidad de campo, bajo luz solar directa.

Tras el periodo de incubación, el suelo fue secado al aire y tamizado en una zaranda con malla de 2 mm. Las muestras resultantes fueron acondicionadas en frascos del 100 mL por 15 días para su posterior análisis en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción (FCA-UNA). Se realizó el fraccionamiento de P de cada muestra en triplicata, utilizando una versión modificada del método descrito por Hedley et al. (1982) con las modificaciones propuestas por Rheinheimer et

al. (2008) que permite extraer desde las formas más disponibles de P hasta las formas más estables de manera secuencial.

Las formas de P extraídas secuencialmente fueron obtenidas por medio de los siguientes extractores: resina de intercambio aniónico (AR 103 QDP 434) (Pi-RIA), bicarbonato de sodio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ en pH 8,5 (Pt- NaHCO_3), hidróxido de sodio $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (P-NaOH 0,1), ácido clorhídrico $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ (Pi-HCl), hidróxido de sodio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (P-NaOH 0,5). Todos los extractores permanecieron en contacto con las muestras de suelo durante 16 horas en agitador tipo sin fin a 33 rpm con una posterior centrifugación por 20 minutos. Posteriormente, el residuo fue secado, molido y se extrajo el P residual (P-residual) por el método de ácido sulfúrico (H_2SO_4) + peróxido de hidrógeno (H_2O_2) + cloruro de magnesio (MgCl_2).

En los extractos alcalinos de la solución NaHCO_3 e NaOH $0,1$ y $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, respectivamente, se determinó el P inorgánico (Pi) por el método de Dick y Tabatabai (1977) y el P total de esas fracciones, realizando la extracción por digestión con persulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) y H_2SO_4 en autoclave a 121°C y posteriormente determinado por el método de Murphy y Riley (1962), por diferencia se calculó el P orgánico (Po) de esa fracción.

Por último, fueron clasificadas las extracciones por el fraccionamiento de Hedley en Pi-RIA + Pt- NaHCO_3 compuesto a su vez por la fracción inorgánica (Pi- NaHCO_3) y orgánica (Po- NaHCO_3) como P lábil; P-NaOH $0,1 \text{ M}$ orgánico e inorgánico + Pi-HCl como moderadamente lábil y el P-residual + P-NaOH $0,5 \text{ M}$ orgánico e inorgánico como no lábil. El cálculo del P total de la muestra fue estimado a través de la sumatoria de todas las extracciones (Cross y Schlesinger, 1995).

Los datos obtenidos fueron sometidos al test de normalidad por Shapiro Wilk con el programa Assisat. Dado que los datos presentaron una distribución normal se realizó el análisis de varianza utilizando el programa estadístico Agroestat. En los casos en que se encontraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), se realizaron análisis de regresión, para evaluar la relación entre las dosis de gallinaza y las fracciones de P en el suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de gallinaza produjo incremento de las formas de P en todas las fracciones, evaluadas, con excepción del P no lábil (Tabla 1).

Tabla 1. Valores medios de las fracciones de fósforo del fraccionamiento de Hedley resultantes de la aplicación de dosis de gallinaza en un Ultisol franco arenoso de Santa Rosa, Misiones. 2020

Table 1. Mean values of phosphorus fractions from the Hedley fractionation in response to increasing rates of chicken manure in a sandy loam Ultisol from Santa Rosa, Misiones. 2020

Dosis de gallinaza	Pi-RIA	Pi-NaH-CO ₃	Po- Na- HCO ₃	Pi-NaO- HO,1M	Po- NaO- HO,1M	Pi-HCl	Pi- NaO- HO,5M	Po- NaOH 0,5M	Pi-residual	P total	P lábil	P moderadamente lábil	P no lábil
Mg ha ⁻¹	mg kg ⁻¹ (%)												
0	13,5 d	6,5 d	15,7 c	10,7 b	16,9 b	4,2 b	2,3 c	7,2 b	148,1 ^{ns}	225,0 b	35,7 d (15,9)	31,7 c (14,1)	157,6 ^{ns} (70,0)
1	13,8 d	6,3 d	19,6 c	8,2 b	21,2 a	5,2 b	2,5 c	9,7 b	131,6	218,2 b	39,7 d (18,2)	34,6 c (15,9)	143,8 (65,9)
2	16,5 c	6,7 d	20,3 c	10,8 b	19,4 b	4,3 b	2,4 c	11,3 b	151,1	242,7 b	43,4 d (17,9)	34,5 c (14,2)	164,8 (67,9)
4	17,4 c	7,4 d	26,8 b	10,4 b	17,5 b	6,2 b	2,6 c	13,9 b	158,2	260,4 b	51,6 c (19,8)	34,1 c (13,1)	174,7 (67,1)
6	19,3 c	8,6 c	31,8 a	12,3 b	19,0 b	8,1 b	3,2 b	14,9 b	188,3	305,5 a	59,7 b (19,5)	39,4 b (12,9)	206,4 (67,6)
8	22,5 b	9,1 c	34,4 a	11,8 b	21,6 a	7,8 b	2,9 c	11,0 b	178,7	299,8 a	65,9 b (22,0)	41,2 b (13,8)	192,6 (64,3)
10	22,6 b	10,1 b	35,5 a	12,6 b	23,8 a	6,9 b	3,0 b	12,5 b	151,7	278,7 a	68,1 b (24,4)	43,3 b (15,5)	167,3 (60,0)
12	28,2 a	11,8 a	38,5 a	15,5 a	25,9 a	11,7 a	3,7 a	13,7 b	202,7	351,7 a	78,5 a (22,3)	53,1 a (15,1)	220,1 (62,6)
14	27,8 a	11,9 a	39,4 a	15,6 a	24,0 a	14,4 a	3,7 a	22,1 a	135,6	294,4 a	79,1 a (26,9)	54,0 a (18,3)	161,3 (54,8)
Valores de F	31,16**	15,81**	19,11**	8,48**	4,78**	4,06**	8,70**	6,02**	1,11 ^{ns}	3,46*	38,43**	18,20**	1,19 ^{ns}
CV (%)	8,5	10,9	12,0	11,9	11,7	28,8	10,4	22,8	24,7	14,5	7,8	8,2	22,3

ns: No significativo; **: significativo a 1%; *: significativo al 5% de probabilidad. Medias seguidas por la misma letra minúscula en la columna no difieren entre sí por el test de Scott-Knott al nivel de 5%. (%): Porcentaje del P total que cada fracción representa. Pi-RIA= Fósforo lábil extraído con resina de intercambio aniónico; Pi-NaHCO₃= Fósforo inorgánico lábil extraído con bicarbonato de sodio; Po-NaHCO₃= Fósforo orgánico lábil extraído con bicarbonato de sodio; Pi-NaOH0,1 M = Fósforo inorgánico moderadamente lábil extraído con hidróxido de sodio a 0,1 M; Po-NaOH0,1M = Fósforo orgánico moderadamente lábil extraído con hidróxido de sodio a 0,1 M; Pi-HCl = Fósforo inorgánico moderadamente lábil extraído con ácido clorhídrico; Pi-NaOH0,5M = Fósforo inorgánico no lábil extraído con hidróxido de sodio a 0,5Mol; Po-NaOH0,5 M = Fósforo orgánico no lábil extraído con hidróxido de sodio a 0,5M.

Fósforo lábil

El P lábil (suma de $Pi-RIA$ y $Pt-NaHCO_3$), que es la fracción de P disponible para las plantas a corto plazo, aumentó de forma lineal con la aplicación de gallinaza. El testigo presentó un valor de $37,5 \text{ mg kg}^{-1}$ mientras que para la dosis de 14 Mg ha^{-1} fue $79,1 \text{ mg kg}^{-1}$. Además, se observó un incremento de $3,2 \text{ mg}$ de P por Mg de gallinaza aplicada (Figura 1).

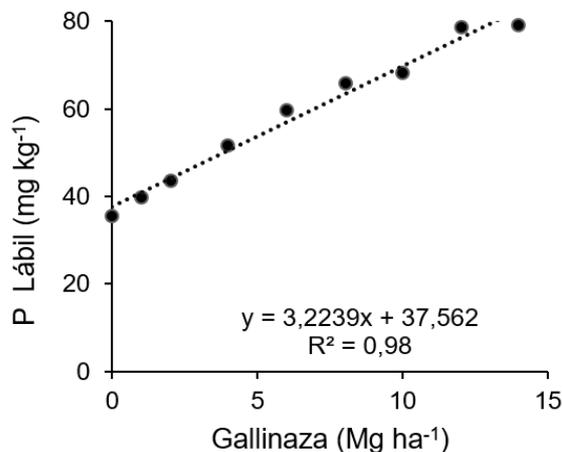


Figura 1. Contenido de P lábil en función de las dosis crecientes de gallinaza en un Ultisol franco arenoso de Santa Rosa, Misiones. 2020

Figure 1. Labile P content as a function of increasing rates of chicken manure in a sandy loam Ultisol from Santa Rosa, Misiones. 2020

El P lábil es la fracción de mayor importancia agronómica, e inclusive ambiental. Se evidencia que la aplicación de gallinaza promueve una mayor disponibilidad de P para la planta en el corto plazo. Se observa que el P lábil porcentualmente aumenta al aplicar mayores dosis de gallinaza, representando el 15,9% del P total en el testigo y llegando a 26,9% del P total con la mayor dosis de gallinaza (14 Mg ha^{-1}).

La fertilización química aumenta principalmente el Pi en la fracción lábil del suelo. En cambio, las enmiendas orgánicas tienden a incrementar el Po en esa misma fracción, dado que su disponibilidad depende de la mineralización de los residuos orgánicos (Redel et al., 2011).

Fósforo moderadamente lábil

Se evidenciaron diferencias significativas en la fracción de P moderadamente lábil. Se observó un aumento de $1,57 \text{ mg}$ de esta fracción por cada Mg de gallinaza (Figura 2). Los resultados obtenidos en el P moderadamente lábil presentaron un patrón similar a lo observado en el P lábil, con mayores incrementos en la fracción orgánica (Tabla 1).

El P moderadamente lábil está constituido por la sumatoria de las extracciones de los métodos de $Pt-NaOH$ $0,1 \text{ M}$ (en sus formas $Pi-NaOH$ $0,1 \text{ M}$ y $Po-NaOH$ $0,1 \text{ M}$) y el $Pi-HCl$. Esta fracción actúa como reservorio de P en el suelo, proporcionando P a mediano plazo, proceso que ocurre tras de la desorción de las fases minerales del Pi y de la mineralización del Po (De Oliveira et al., 2015). En promedio, esta fracción representó el 20,8% del P total, y se observó un aumento en su proporción a medida que se aumentaba la dosis de gallinaza (18,3% en el testigo a 27,1% en la dosis de 14 Mg ha^{-1} de gallinaza).

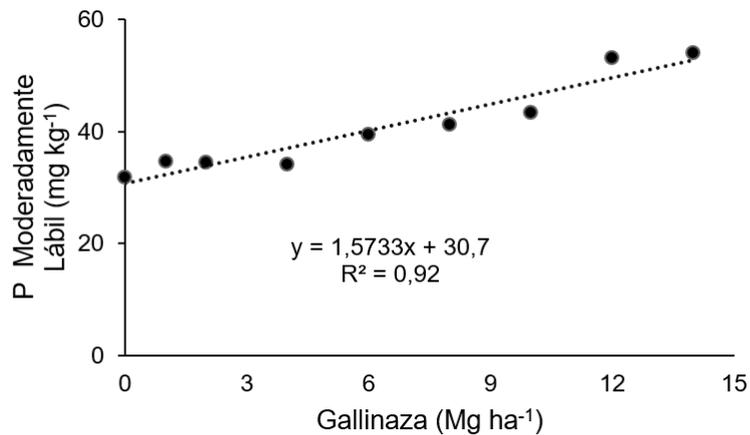


Figura 2. Contenido de P moderadamente lábil en función de las dosis crecientes de gallinaza en un Ultisol franco arenoso de Santa Rosa, Misiones. 2020

Figure 2. Moderately labile P content as a function of increasing rates of chicken manure in a sandy loam Ultisol from Santa Rosa, Misiones. 2020

Los resultados de este estudio son similares a los de Audette et al. (2016), quienes, al investigar la dinámica del P tras la aplicación de fertilizantes inorgánicos y orgánicos, observaron que la fracción de P que experimentó el mayor incremento con las enmiendas orgánicas fue la moderadamente lábil, destacándose sobre las demás fracciones de P.

Fósforo no lábil

La fracción de P no lábil, compuesta por Pt-NaOH 0,5 M y P-residual, no mostró diferencias significativas con la aplicación de gallinaza, con un promedio de 176,5 mg kg⁻¹ (157,6 a 220,1 mg kg⁻¹). Aunque sus valores absolutos no variaron, su proporción disminuyó del 70% del P total en el testigo al 54,8% con 14 Mg ha⁻¹ de gallinaza, debido al aumento de las fracciones lábil y moderadamente lábil.

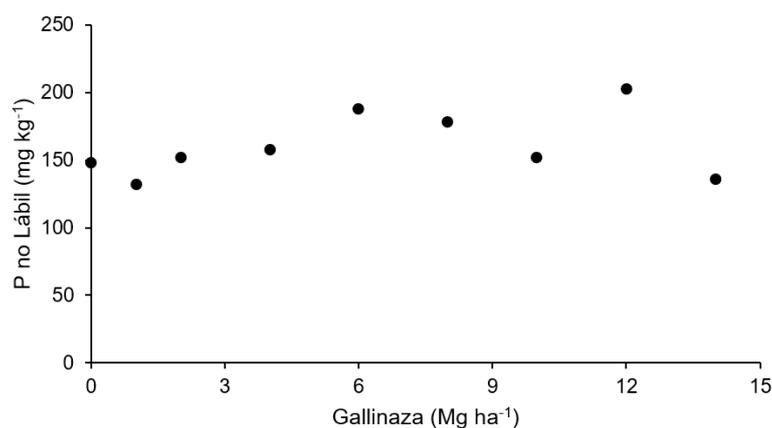


Figura 3. Contenido de P no lábil en función de las dosis crecientes de gallinaza en un Ultisol franco arenoso de Santa Rosa, Misiones. 2020

Figure 3. Content of non-labile P as a function of increasing rates of chicken manure in a sandy loam Ultisol from Santa Rosa, Misiones. 2020

Esta fracción corresponde a las formas de P menos accesibles para las plantas y constituye la principal reserva de P en el suelo. La desorción gradual de este P contribuye a reponer las fracciones lábil y moderadamente lábil (Rheinheimer et al., 2008). Según Picone y Zamuner (2002) existe una relación inversa entre las fracciones orgánica e inorgánica de P [(Pi + Po)] y el (Pt), a medida que disminuye la relación (Pi + Po) / Pt, aumenta la proporción del P residual, reflejando un desplazamiento del P hacia formas menos disponibles.

Por otro lado, Oliveira et al. (2021) observaron que la fertilización orgánica aumentó principalmente el P no lábil del suelo, mientras que la fertilización fosfatada inorgánica las formas más lábiles. Este efecto depende en gran medida, de la textura del suelo, ya que a mayor contenido de arcilla, mayor es la retención de P en formas no lábiles. Sin embargo, en el suelo franco arenoso de este estudio, no se observó dicho aumento del P no lábil tras la fertilización orgánica, lo que puede atribuirse a su menor capacidad de retención de P debido a su baja proporción de arcilla.

Fósforo Total

El P total, resultado de la suma de todas las fracciones extraídas, aumentó significativamente con la aplicación de gallinaza. Este incremento se debe a que la gallinaza, rica en Po, aporta P al suelo, favoreciendo su acumulación a medida que se incorporó, lo que explica el aumento del P total (Figura 4).

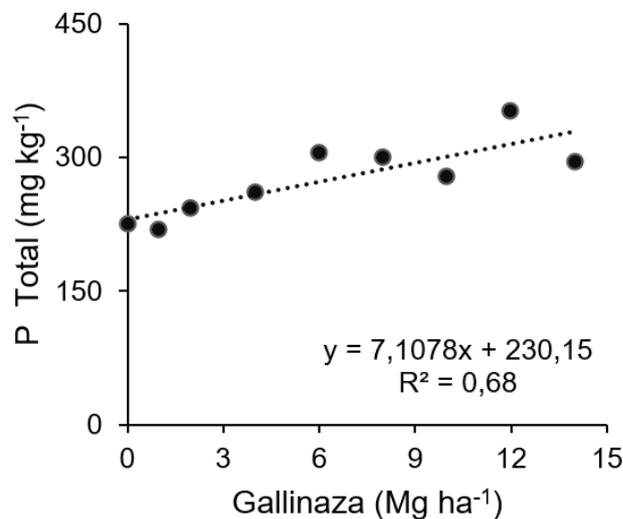


Figura 4. Valores del P total en función de las dosis crecientes de gallinaza en Ultisol franco arenoso de Santa Rosa, Misiones, Región Oriental. 2020

Figure 4. Total P values as a function of increasing rates of chicken manure in a sandy loam Ultisol from Santa Rosa, Misiones, Eastern Region. 2020

Resultados similares fueron presentados en varios estudios. Por ejemplo, en un estudio realizado por Motavalli y Miles (2002), se evaluaron los efectos después de 111 años de aplicación de estiércol de caballo y de lechería en sistemas de cultivo en América del Norte. Observaron aumentos significativos en el P total en comparación con los tratamientos sin fertilizar, lo que sugiere un impacto positivo a largo plazo de la aplicación de estos residuos orgánicos. Además, trabajos como el de Sukitprapanon et al. (2021) han demostrado que la incorporación de residuos orgánicos, independientemente de su calidad, puede provocar la acumulación de P en el suelo, esto se evidencia en el aumento del P total en suelos tropicales arenosos. Aunque algunos investigadores han observado aumentos significativos en la disponibilidad de P debido a la aplicación de enmiendas orgánicas, los resultados de Jantamenchai et al. (2022) y Keller et al. (2012) plantean la necesidad de considerar la variabilidad en la respuesta del suelo a la fertilización orgánica. En el estudio realizado por Jantamenchai et al. (2022) en suelos arenosos tropicales en el que aplicaron residuos orgánicos de diferente calidad encontraron que, independientemente de la calidad del residuo orgánico aplicado, no se produjo un aumento en el Po total. En este contexto, se debe considerar la influencia de la mineralogía de los suelos, ya que en suelos localizados en regiones de clima tropical, la baja cantidad de reservas de nutrientes y su composición mineralógica con predominio de óxidos de hierro y aluminio contri-

buyen a la fijación de P los suelos, reduciendo su disponibilidad para los cultivos y generando la necesidad de aplicaciones de fertilizantes fosfatados para suplir esa demanda (Zhu et al., 2018). Así también, en el trabajo de Keller et al. (2012), llevado a cabo en un experimento de campo a largo plazo en suelo Luvisol háplico, hallaron que, tras un periodo de 30 años en los que se aplicó estiércol animal al suelo, no hubo ningún efecto significativo de la fertilización orgánica en las concentraciones y formas del Po del suelo.

Conforme a los resultados presentados en esta investigación, se deduce que la aplicación de enmiendas orgánicas en el suelo guarda una estrecha relación con el aumento de fracciones orgánicas de P, lo que a su vez influye en la disponibilidad de P a corto y mediano plazo, al reducir la cantidad de P no disponible para las plantas.

CONCLUSIÓN

La aplicación de gallinaza, a corto plazo, incrementa la disponibilidad de P en las fracciones más lábiles del suelo, sin afectar significativamente la proporción de P no lábil. Esta práctica reduce la dependencia de fertilizantes químicos y su impacto ambiental, sugiriendo que la gallinaza podría integrarse en estrategias de manejo agrícola sostenible como una fuente accesible y económica de P. Se recomienda realizar estudios a campo a largo plazo para evaluar sus efectos residuales en suelos y cultivos.

REFERENCIAS

- Audette, Y., O'Halloran, I. P. y Paul Voroney, R. (2016). Kinetics of phosphorus forms applied as inorganic and organic amendments to a calcareous soil. *Geoderma*, 262, 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.021>
- Cross, A. F. y Schlesinger, W. H. (1995). A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, 64(3–4), 197–214. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)00023-4](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)00023-4)
- Casas Rodríguez, S. y Guerra Casas, L. D. (2020). La gallinaza, efecto en el medio ambiente y posibilidades de reutilización. *Revista de Producción Animal*, 32(3):87-102.
- DCEA. (2023). *VI Censo Agropecuario Nacional – CAN 2022. Volumen 1*. https://can2022.mag.gov.py/geoportal/VI_CENSO_AGROPECUARIO_NACIONAL_Volumen_1.pdf
- Dick, W. A. y Tabatabai, M. A. (1977). Determination of Orthophosphate in Aqueous Solutions Containing Labile Organic and Inorganic Phosphorus Compounds. *Journal of Environmental Quality*, 6(1), 82–85. <https://doi.org/10.2134/jeq1977.00472425000600010018x>
- Hedley, M. J., Stewart, J. W. B. y Chauhan, B. S. (1982). Changes in Inorganic and Organic Soil Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 46(5), 970–976. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x>
- International Fertilizer Association - IFA. (2022). <http://www.fertilizer.org>
- Jantamenchai, M., Sukitprapanon, T. S., Tulaphitak, D., Mekboonsonglarp, W. y Vityakon, P. (2022). Organic phosphorus forms in a tropical sandy soil after application of organic residues of different quality. *Geoderma*, 405(May 2021), 115462. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115462>
- Keller, M., Oberson, A., Annaheim, K. E., Tamburini, F., Mäder, P., Mayer, J., Frossard, E. y Bünemann, E. K. (2012). Phosphorus forms and enzymatic hydrolyzability of organic phosphorus in soils after 30 years of organic and conventional farming. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(3), 385–393. <https://doi.org/10.1002/jpln.201100177>
- López Gosrostitiagi, LG y Lesme, JA. (2024). *Grandes grupos de suelos de la region Oriental del Paraguay*. San Lorenzo, Paraguay: Sociedad Paraguaya de Ciencia del Suelo.
- Motavalli, P. P. y Miles, R. J. (2002). Soil phosphorus fractions after 111 years of animal manure and fertilizer applications. *Biology and Fertility of Soils*, 36(1), 35–42. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0500-6>
- Murphy, J. y Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27(C), 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
- Oliveira, L. C. A., de Almeida Carneiro, M., Litter, F. A., de Carvalho, M. A. C., Yamashita, O. M. y Caione, G. (2021). Phosphorus fractions as a function of the use of phosphate fertilizers in different soil classes. *Revista em Agronegocio e Meio Ambiente*, 14(4), 1025–1035. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021V14N4E8921>
- De Oliveira, C. M. B., Erich, M. S., Gatiboni, L. C. y Ohno, T. (2015). Phosphorus fractions and organic matter chemistry under different land use on Humic Cambisols in Southern Brazil. *Geoderma Reg.*;5:140-9. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.06.001>
- Picone, L. I. y Zamuner, E. (2002). Fósforo orgánico y fertilidad fosfórica. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 16, 11–15. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/E8E2F139150F1B6D8525799C0058C6C3/\\$FILE/nota3.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/E8E2F139150F1B6D8525799C0058C6C3/$FILE/nota3.pdf)
- Redel, Y. D., Escudey, M., Alvear, M., Conrad, J. y Borie, F. (2011). Effects of tillage and crop rotation on chemical phosphorus forms and some related biological activities in a Chilean Ultisol. *Soil Use and Management*, 27(2), 221–228. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00334.x>

- Rheinheimer, D. S. D., Gatiboni, L. C. y Kaminski, J. (2008). Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciencia Rural*, 38(2), 576–586. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049>
- Rheinheimer, D. dos S., Fornari, M. R., Bastos, M. C., Fernandes, G., Santanna, M. A., Calegari, A., dos Santos Canalli, L. B., Caner, L., Labanowski, J. y Tiecher, T. (2019). Phosphorus distribution after three decades of different soil management and cover crops in subtropical region. *Soil and Tillage Research*, 192(January), 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.018>
- Salinas Godoy, O. N., Enciso Garay, C. R. y Ríos Arévalos, R. (2013). Respuesta del Maíz dulce (*Zea mays* 1l. var. *saccharata*) a la aplicación de dosis crecientes de gallinaza. *Investigación Agraria*, 9(1), 67–72. <https://www.agr.una.py/revista/index.php/ria/article/view/90/86>
- Sukitprapanon, T. S., Jantamenchai, M., Tulaphitak, D., Prakongkep, N., Gilkes, R. J. y Vityakon, P. (2021). Influence of application of organic residues of different biochemical quality on phosphorus fractions in a tropical sandy soil. *Agronomy*, 11(2), 11020248. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020248>
- Vázquez, S., Morales, L. A., López, C. F. y Dalurzo, H. C. (2011). Fertilización fosfatada y fracciones de fósforo en alfisoles, ultisoles y oxisoles. *Ciencia Del Suelo*, 29(2), 161–171. <https://www.ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/13>
- Zhu, J., Li, M. y Whelan, M. (2018). Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. *Science of the Total Environment*, 612, 522-37. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.095>