

TEXTURA DEL SUELO Y TIPO DE AGUA DE RIEGO EN LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO DE ESTIÉRCOL BOVINO

Soil Texture and Type of Irrigation Water on Phosphorus Availability from Cow Manure

Juan Pedro Flores Márgez^{1‡}, Cecilia Valero Córdoba¹, Pedro Osuna Ávila¹, Baltazar Corral Díaz¹, Manoj K. Shukla² y Enrique Salazar Sosa³

RESUMEN

La falta de información sobre la disponibilidad de macronutrientes, como el fósforo, en los suelos agrícolas tratados con estiércol bovino e irrigado con aguas negras fue lo que motivó el presente estudio. La variabilidad de los tipos de suelo, los sistemas de manejo y la calidad del agua de riego, son factores que influyen en la mineralización del estiércol en el Valle de Juárez, Chihuahua. El objetivo del presente estudio fue evaluar la cantidad de fósforo mineralizado de estiércol bovino lechero en tres tipos de suelo y dos tipos de agua de riego, en incubación en campo. El experimento se realizó en un predio del Instituto de Ciencias Biomédicas (ICB), de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), de marzo a septiembre de 2010. Los factores en estudio fueron tres tipos de suelo Fluvisoles (con textura franco-arenoso, franco y arcilloso), dos calidades de agua (agua negra de tratamiento primario del canal de descarga en las plantas de tratamiento de la ciudad, y agua potable) con dos niveles de estiércol: 0 y 50 Mg ha⁻¹, con base en peso seco. El diseño experimental fue completamente al azar con un arreglo factorial con cuatro repeticiones; las unidades experimentales fueron cilindros de aluminio de 5 × 15 cm. La conductividad eléctrica de los suelos aumentó significativamente con la aplicación de estiércol, de 3.11 a 3.77 dS m⁻¹, en promedio; la humedad del suelo mostró un aumento de 5.09 a 6.52% al final del experimento en los tratamientos con estiércol. No se detectó efecto significativo en la mineralización de P (fósforo) entre los tratamientos para el factor tipo de agua. Los niveles de P Olsen detectados en el suelo,

al final del experimento, después de 206 días de incubación, fueron de 40.8, 54.4 y 30.5 mg kg⁻¹ para los suelos arcilloso, franco y franco-arenoso, respectivamente. Las concentraciones estimadas de P Olsen mineralizado neto fueron de 17.4, 24.4 y 18.7 mg kg⁻¹; y la estimación de P disponible para las plantas fue de 78.8, 87.5 y 84.5 kg ha⁻¹ para los mismos suelos. Los resultados del estudio muestran que la aplicación de estiércol y el tipo de suelo afectan la disponibilidad de P Olsen, pero no el tipo de agua, por lo que debe considerarse en el manejo de los suelos para mejorar el uso del estiércol como fertilizante orgánico.

Palabras clave: *descomposición de materia orgánica, mineralización, agua residual, salinidad.*

SUMMARY

There is little information relative to mineralization of macronutrients, such as phosphorus, in agricultural soils amended with manure and irrigated with sewage water. Soil variability and management systems as well as the type of water existing in the Valle de Juarez, Chihuahua, are factors that have significant effect on manure mineralization. The objective of this study was to determine the amount of phosphorus from dairy manure mineralized in three soils irrigated with two types of water under field conditions. The experiment was conducted at the Biomedical Sciences Institute of the Universidad Autónoma de Ciudad Juarez, from March to September 2010. The factors studied were three textural types of soils: sandy loam, loam, and clay; two type of water: treated sewage water from the main water treatment plant at Ciudad Juarez and tap water; and two manure rates: 0 and 50 Mg ha⁻¹ dry weight base. The experimental units were 5 × 15 cm aluminum cylinders. The experimental design was completely randomized with a factorial arrangement, and 12 treatments with four replications. Electric conductivity increased significantly in soils as a result of manure application from 3.11 to 3.77 dS m⁻¹; soil moisture

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, UACJ. Av. Plutarco Elias Calles no. 1210. 32310 Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

[‡] Autor responsable (floresmargez@hotmail.com)

² New Mexico State University, Plant and Environmental Sciences. 88003 Las Cruces, NM, USA.

³ Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia. 35110 ejido Venecia, Gómez Palacio, Durango, México.

increased from 5.09 to 6.52% at the end of the experiment as an effect of manure application. There was no effect of wastewater on P mineralization. The amount of P Olsen detected in soils at the end of the experiment after 193 days of incubation were 40.8, 54.4, and 30.5 mg kg⁻¹ for the clay, loam, and sandy loam soils, respectively. The net amounts of mineralized P Olsen were 17.4, 24.4, and 18.7 mg kg⁻¹ for the same soils, and P available for plants was 78.8, 87.5, and 84.5 kg ha⁻¹. The results of this study demonstrate that manure application and soil type affect the availability of P Olsen, but not the type of water. This should be considered in soil management to improve the use of manure as organic fertilizer in areas where treated wastewater is being increasingly used for irrigation due to low availability of fresh water.

Index words: *organic matter decomposition, mineralization, salinity, wastewater.*

INTRODUCCIÓN

La mineralización de la materia orgánica es un factor de suma importancia en el mantenimiento de la fertilidad de los suelos, a través de este proceso se reciclan los nutrientes y se puede conocer la disponibilidad nutrimental en el suelo, para hacer más eficiente el uso de fertilizantes y abonos orgánicos (Havlin *et al.*, 1999; Jarvis *et al.*, 1996). La mayoría de los estudios de mineralización de materiales orgánicos se ha enfocado a nitrógeno, incluso se han desarrollado índices de este nutriente de enorme utilidad para evaluar las pérdidas en sistemas intensivos para la producción de forraje en México (Figueroa *et al.*, 2011). Estudios recientes en diferentes tipos de suelo han concluido que la textura del suelo afecta la mineralización de nitrógeno, aunque los patrones estacionales tienen mayor efecto en esta, por los cambios de temperatura (Watts *et al.*, 2010). Las compilaciones de información reciente sobre las tasas de mineralización de materia orgánica, en zonas áridas, se han enfocado al estudio del nitrógeno (Celaya y Castellanos, 2011), así como, a los estudios de mineralización con el método de resinas sintéticas en experimentos de campo, donde a los suelos se les ha añadido estiércol bovino lechero (Flores *et al.*, 2008) y biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas negras, con sistemas de tipo primario avanzado (Flores *et al.*, 2007).

Por lo anterior, ha sido menor la atención dedicada a otros nutrientes de importancia económica como el fósforo, principalmente en suelos agrícolas. Además, han sido escasos los estudios para sistemas de producción donde se utilizan aguas negras o residuales. Tal es el caso de las áreas agrícolas del Valle de Juárez, Chihuahua, que se han irrigado con aguas negras desde hace 30 años, donde la actividad lechera ha sido común, así como la utilización del estiércol bovino como abono orgánico, se producen 138 mil toneladas de éste al año (peso húmedo), 34 kg de estiércol producido por día (Flores *et al.*, 2008). El problema radica en que los productores aplican el estiércol sin conocimiento de la dosis, las características químicas y de humedad de éste, ni de las condiciones físicas y químicas del suelo, por lo que se ha incrementado la salinización de los suelos en el citado valle. También, existen otros factores, como el deficiente sistema de drenes o el uso de agua salina de pozos mezclada con aguas negras o residuales, entre otros (Flores *et al.*, 2009; Flores *et al.*, 2008).

La excesiva aportación de fósforo proveniente de las aguas residuales y estiércoles puede causar problemas de toxicidad y reducir la disponibilidad de otros nutrientes para las plantas; además, el agua de drenaje de los suelos agrícolas se transfiere a los cuerpos de agua, donde puede causar eutroficación y serios problemas cuando se utiliza para la recreación, la pesca o para beber (Correll, 1998). Esto puede pasar en el Valle de Juárez porque el agua de drenaje agrícola y las aguas residuales de Ciudad Juárez llegan al Río Bravo (Olivas *et al.*, 2011). También el exceso de fósforo puede contaminar los acuíferos a través de infiltraciones (Koopmans *et al.*, 2007).

La textura del suelo y el tipo de drenaje influyen en las pérdidas de fósforo por lixiviación en las aguas superficiales, asimismo, la mineralización de la materia orgánica o formas minerales fácilmente solubles son posibles vías de pérdidas de fósforo de suelos agrícolas. Suelos arenosos con producción animal intensiva y alta aplicación de estiércol presentan acumulación de P en el perfil del suelo, con su subsecuente lixiviado a mantos acuíferos (Chardon y Schoumans, 2007; Salas *et al.*, 2003). Dado que la respiración del suelo es buen indicador de la fertilidad y actividad microbiana del suelo, Haney *et al.* (2008) evaluaron un método basado en la liberación de CO₂, concluyeron que el método con gel de solvita y análisis de CO₂ podría dar buena información de la actividad microbiana y mineralización de N y P, en

suelos tratados con composta de estiércol proveniente de ganado lechero. Estos autores encontraron una correlación entre el CO₂ liberado y el N y el P mineralizados, después de 28 días de incubación, al utilizar dosis de 0 a 80 Mg ha⁻¹. La mineralización de N y P varió entre 0 y 30 mg kg⁻¹.

Las aplicaciones continuas de estiércol y fertilizante inorgánico pueden resultar en el enriquecimiento del suelo y en el riesgo ambiental asociado a las concentraciones de fósforo que pueden ser mayores a 60 mg kg⁻¹ (Castellanos *et al.*, 2000). Dao y Cavigelli (2003), mencionan que el fósforo tiene la particularidad de que permanece en el suelo, a diferencia del carbono, que se pierde por respiración microbiana y el nitrógeno que se volatiliza o se lixivía. Las variaciones en la composición química de fósforo y la falta de certidumbre en la predicción de liberación de nutrientes de estiércoles y compost todavía dificultan la predicción de tasas de descomposición y tamaños de reservas, sin utilizar incubaciones de laboratorio de largo plazo (Kalbasi y Karthikeyan, 2004). Dada la necesidad de realizar estudios sobre las aportaciones de fósforo al agua residual y de la eficiencia de las aplicaciones de estiércoles en suelos agrícolas con diferente textura, se llevó a cabo el presente estudio para evaluar la cantidad de fósforo mineralizado y nitrógeno total proveniente de estiércol bovino, en tres tipos de suelo y con dos calidades de agua de riego, en condiciones de campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en un predio utilizado para la propagación de plantas y elaboración de compost, junto al edificio Q del Instituto de Ciencias Biomédicas (ICB) de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), localizado a 31° 44' 45.53" N y 106° 26' 33.24" O (www.google.earth). El estudio se realizó de marzo a septiembre de 2010, durante el ciclo agrícola primavera-verano, el de mayor actividad en el Valle de Juárez, Chihuahua. Los factores en estudio fueron 1) tres tipos de suelo Fluvisoles de las Series Caseta (arcilloso) y Juárez (franco y franco-arenoso), los cuales fueron formados por aluvión en las planicies sujetas a inundación por el río Bravo y por arroyos en terrazas bajas (CIEPS, 1970). La clasificación US-Taxonomy los indica como fine-silty, mixed, calcareous, thermic typic torrifluvents (USDA, 1980); 2) la calidad de agua de riego, con dos tipos: residual del canal de descarga en

las plantas de tratamiento de aguas negras y potable de la llave, esta última para representar el riego con agua del río Bravo o de pozos que son comunes en la región; 3) el estiércol aplicado, con dos niveles: 0 y 50 Mg ha⁻¹, con base en peso seco. El diseño experimental fue completamente al azar, factorial con 12 tratamientos (Cuadro 1). El ensayo tuvo cuatro repeticiones, lo que dio un total de 48 unidades experimentales, consistentes en cilindros de aluminio de 5 cm de diámetro y 15 cm de largo (Figura 1). Los cilindros se llenaron, conforme a cada tratamiento, con suelo, estiércol y agua de riego. En cada cilindro se agregaron entre 270 y 300 g de suelo (dependiendo de la textura), la dosis de estiércol indicada y 100 mL de agua dependiendo del tipo riego.

Los cilindros se marcaron con tinta permanente y se colocaron en el suelo, en orificios separados a 10 cm. Durante el estudio se agregó agua a los cilindros, para mantener la humedad del suelo lo más cercano a la capacidad de campo y favorecer la actividad microbiana, aunque los tratamientos con textura arenosa presentaron menor humedad durante el estudio. El análisis granulométrico del suelo se realizó mediante la técnica del hidrómetro de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962; Day, 1965). El análisis de nitrógeno inorgánico (NH₄ + NO₃) del suelo fue mediante extracción con KCl 2 N, óxido de magnesio para determinar el NH₄ y aleación de Devarda para NO₃, en ambos casos se tituló con ácido sulfúrico (Mulvaney, 1996). El nitrógeno total Kjeldahl (NTK) del suelo y del estiércol se determinaron mediante

Cuadro 1. Tratamientos evaluados que incluyen el tipo de suelo, dosis de estiércol y tipo agua de riego

| Tratamiento | Textura del suelo | Dosis de estiércol | Tipo de agua |
|-------------|-------------------|---------------------|--------------|
| | | Mg ha ⁻¹ | |
| 1 | Arcilloso | 0 | Agua regular |
| 2 | Arcilloso | 0 | Agua negra |
| 3 | Arcilloso | 50 | Agua regular |
| 4 | Arcilloso | 50 | Agua negra |
| 5 | Franco | 0 | Agua regular |
| 6 | Franco | 0 | Agua negra |
| 7 | Franco | 50 | Agua regular |
| 8 | Franco | 50 | Agua negra |
| 9 | Franco-arenoso | 0 | Agua regular |
| 10 | Franco-arenoso | 0 | Agua negra |
| 11 | Franco-arenoso | 50 | Agua regular |
| 12 | Franco-arenoso | 50 | Agua negra |



Figura 1. Unidades experimentales representadas por cada cilindro de aluminio de 15 cm de altura y 5 cm de diámetro.

digestión ácida (Bremner, 1996) y la materia orgánica del suelo con el método de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1996). El pH y la conductividad eléctrica del suelo se determinaron con un electrodo Pinchale Corning 530 y un conductímetro Orion 3 Star, respectivamente (Rhoades, 1996).

El fósforo inorgánico del suelo se determinó con el método Olsen, con un espectrofotómetro Genesys 20 (Olsen y Sommers, 1982). El análisis de estiércol consistió en preparar una pasta de saturación, de la cual se obtuvo un extracto para determinar N inorgánico

(Mulvaney, 1996), fósforo soluble, con un espectrofotómetro (Olsen y Sommers, 1982), pH y conductividad eléctrica, determinados directamente en el extracto (Rhoades, 1996). A los datos generados se les realizó un análisis de varianza para un diseño completamente al azar con arreglo factorial $3 \times 2 \times 2$, la separación de promedios se realizó mediante la técnica de comparación múltiple de la diferencia mínima significativa (DMS), así como análisis de correlación y regresión lineal simple entre fósforo Olsen, NTK, humedad del suelo y densidad aparente. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el paquete computacional SPSS versión 17 (Acton y Miller, 2009).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los Suelos, Estiércol y Agua

Los suelos analizados acorde a su pH se clasificaron como medianamente alcalinos. Los suelos arenoso y arcilloso presentaron bajos niveles de salinidad, mientras que el suelo franco presentó más de 4 dS m^{-1} (Cuadro 2), lo que indica que fue un suelo salino (Aceves, 2011). El N inorgánico fue muy bajo en el suelo franco-arenoso, bajo en el suelo arcilloso y medio en el suelo de textura franco (Castellanos *et al.*, 2000) (Cuadro 2). Con respecto a P Olsen, el suelo franco-arenoso fue bajo y los otros suelos muy altos, ya que concentraciones superiores a 11 mg kg^{-1} son suficientes para abastecer la demanda de cultivos como trigo y algodón (Havlin

Cuadro 2. Características químicas y físicas de los suelos, y química del estiércol y agua de riego.

| Variable | Tipo de Suelo | | | Estiércol | Tipo de agua | |
|---|----------------|--------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| | Franco-arenoso | Franco | Arcilloso | | Llave | Negra |
| pH | 8.44 | 8.16 | 8.27 | 9.0 | 7.1 | 7.65 |
| CE (dS m^{-1}) | 0.30 | 5.05 | 2.86 | 41.4 | 1.4 | 1.0 |
| NH_4^+ (mg kg^{-1}) | 1.82 | 1.61 | 1.94 | 98.0 | 0.0 | 21.0 |
| NO_3^- (mg kg^{-1}) | 2.03 | 19.67 | 9.42 | 7.5 | 0.0 | 0.0 |
| $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ | 3.85 | 21.28 | 11.36 | 105.5 | 0.0 | 21.0 |
| P Olsen (mg kg^{-1}) | 4.14 | 34.09 | 17.84 | 68.2 | 0.0 | 8.0 |
| MO (%) | 0.70 | 1.41 | 1.42 | na ¹ | na | na |
| Arena (%) | 66.20 | 48.36 | 16.36 | na | na | na |
| Limo (%) | 22.00 | 36.00 | 38.00 | na | na | na |
| Arcilla (%) | 11.80 | 15.64 | 45.64 | na | na | na |
| NTK (mg kg^{-1}) | 630 | 960 | 970 | 15000 | na | na |
| Saturación (%) | 20.0 | 33.3 | 56.7 | na | na | na |

¹na = no analizado.

et al., 1999). En cuanto a materia orgánica y nitrógeno total resultaron bajos los tres suelos (Castellanos *et al.*, 2000), pero el franco-arenoso está cercano a la clasificación de muy bajo en estas variables. Esta información refleja que se cubrió buena parte de la variabilidad edáfica al incluir las tres series de suelo más importantes que existen en el Valle de Juárez (CIEP, 1970), lo cual conlleva a la utilidad de la información generada para los sistemas de producción regional.

El estiércol presentó pH alcalino, conductividad eléctrica fuertemente salina, el contenido de N-NH_4^+ fue alto en comparación con N-NO_3^- , y alto en P Olsen (Cuadro 2). El pH del agua de riego de la llave fue neutro y el del agua residual fue ligeramente alcalina, ambas fuentes de riego fueron no salinas (Aceves, 2011).

Caracterización de los Diferentes Tratamientos

La temperatura del suelo en los cilindros de incubación varió poco entre las texturas de suelo, por ello se decidió reportar solo un registro por fecha, lo cual en promedio fue 31.6°C y un intervalo de 19.5 a 45.9°C durante marzo a septiembre de 2010 (Figura 2). Estas temperaturas favorecen la actividad microbiana y la mineralización de materia orgánica, ya que las condiciones óptimas para una mineralización adecuada son de 30 a 35°C de temperatura del suelo, entre -33 a -10 kPa de potencial de agua del suelo, pH entre 6 a 8 y textura de suelo franco (Cassman y Munns, 1980; Jarvis *et al.*, 1996; Flores *et al.*, 2008).

La aplicación de estiércol (50 Mg ha^{-1}) causó una disminución significativa de la densidad aparente en las tres texturas de 0.06 g cm^{-3} , después de 206 días de incubación en campo, lo cual puede atribuirse que al agregar materia orgánica al suelo aumentó el espacio poroso y, por ende, disminuyó el peso del suelo en el cilindro. El rango de densidad aparente para todas las unidades experimentales observada en este estudio fue de 1.47 g cm^{-3} para el tratamiento de suelo franco-arenoso sin estiércol y 1.148 g cm^{-3} para el suelo arcilloso con 50 Mg ha^{-1} de estiércol, este resultado coincide con lo indicado por Brady y Weil (1996), que afirman que la aplicación de estiércol promueve mayor porosidad del suelo y mejora la actividad microbiana al permitir mayor flujo de agua, aire y nutrientes.

El tipo de suelo causó un efecto altamente significativo en las variables fósforo, nitrógeno total, CE, pH y humedad del suelo ($P < 0.01$), al igual que el estiércol (con excepción del pH) el tipo de agua de riego utilizada significó diferencias altamente significativas entre tratamientos para la variable CE del suelo, mientras que la interacción agua \times estiércol registró efecto significativo para el pH del suelo (Cuadro 3).

Las variables densidad aparente, humedad del suelo final, CE, NT y P Olsen resultaron estadísticamente diferentes entre los tres tipos de suelos, como efecto fijo de este factor en estudio, a todos los niveles de los otros factores: tipo de agua y dosis de estiércol (Cuadro 4). De esta forma, la concentración promedio de P Olsen fue mayor estadísticamente para el suelo de

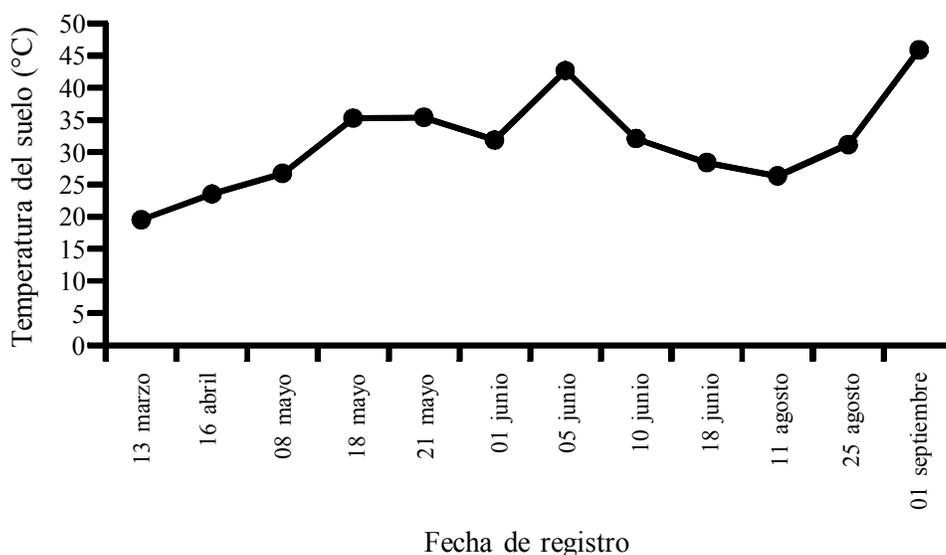


Figura 2. Temperatura del suelo registrada en los cilindros durante el periodo experimental de marzo a septiembre de 2010.

Cuadro 3. Probabilidad de error (P) para las variables fósforo, nitrógeno total, conductividad eléctrica, pH y humedad del suelo.

| Fuente de variación | Gardos de libertad | Fósforo Olsen | Nitrógeno total | Conductividad eléctrica | pH | H ₂ O |
|------------------------|--------------------|---------------|-----------------|-------------------------|----------|------------------|
| Suelo | 2 | 0.0001** | 0.0001** | 0.0001** | 0.0035** | 0.0001** |
| Estiércol | 1 | 0.0001** | 0.0001** | 0.0001** | 0.187 | 0.0419* |
| Agua | 1 | 0.7824 | 0.4028 | 0.009** | 0.1214 | 0.9706 |
| Suelo × estiércol | 2 | 0.4349 | 0.1086 | 0.4939 | 0.5957 | 0.3777 |
| Suelo × agua | 2 | 0.2746 | 0.379 | 0.1389 | 0.4965 | 0.4897 |
| Agua × estiércol | 1 | 0.3602 | 0.2127 | 0.1859 | 0.0246* | 0.7639 |
| Suelo estiércol × agua | 2 | 0.5172 | 0.6922 | 0.5704 | 0.1316 | 0.4061 |

Nivel de significancia observado = Pr > F: *, **, prueba de F significativa al 0.05 y 0.01 nivel de probabilidad, respectivamente; H₂O = porcentaje de humedad en el suelo al final del experimento.

textura franco seguido del suelo arcilloso, esto atribuido a una mayor actividad microbiana en el suelo franco, lo cual produjo mayor mineralización de fósforo, en cambio el suelo franco-arenoso fue el que menor cantidad de fósforo mineralizado presentó, ya que su textura no permitió una mayor actividad microbiana debido a la baja presencia de bacterias y retención de humedad por el menor espacio poroso que presenta este suelo (Jarvis *et al.*, 1996).

El suelo franco-arenoso mostró la concentración de NT significativamente menor, mientras que entre los otros suelos no hubo diferencia significativa (Cuadro 4). El pH varió poco y fue significativamente menor en el suelo franco, mientras que la CE fue mayor en el suelo arcilloso y menor en el franco-arenoso.

La adición de estiércol y la dosis de 50 Mg ha⁻¹, causó un aumento promedio entre suelos de 0.661 dS m⁻¹ en la conductividad eléctrica, debido a que el estiércol

contiene altos niveles de sales. Así también, la humedad del suelo, al final del experimento, aumentó con la aplicación de estiércol (Cuadro 5), es decir, el estiércol conserva el agua del suelo, lo cual es benéfico para las plantas y los microorganismos del suelo, ya que necesitan humedad para realizar sus funciones metabólicas y transpiración, y a su vez puedan absorber agua y nutrientes del suelo (Jarvis *et al.*, 1996). La concentración de fósforo aumentó 24 mg kg⁻¹, en promedio, con la aplicación de 50 Mg ha⁻¹ de estiércol bovino, mientras que el NTK aumentó 248 mg kg⁻¹ en promedio con dicha dosis. En el Cuadro 5 se muestran los promedios para el efecto fijo de la dosis de estiércol para las combinaciones de niveles de tipo de agua de riego utilizado y en los tres niveles referidos como tipos de suelo en conjunto, es decir, no es un promedio directo, sino que se obtuvo del análisis del promedio de la DMS para las combinaciones con y sin estiércol.

Cuadro 4. Características físicas y químicas de los diferentes suelos al final del experimento.

| Características | Tipo de suelo | | |
|---|----------------------|----------|-----------|
| | Franco-arenoso | Franco | Arcilloso |
| P Olsen (mg kg ⁻¹) | 19.06 c ¹ | 39.78 a | 29.94 b |
| NTK (mg kg ⁻¹) | 624.69 b | 975.34 a | 971.68 a |
| CE (dS m ⁻¹) | 2.666 c | 3.170 b | 4.491 a |
| pH | 8.40 a | 8.32 b | 8.42 a |
| Densidad aparente (g cm ⁻³) | 1.387 a | 1.265 b | 1.208 c |
| Humedad del suelo (%) | 2.91 c | 5.71 b | 8.81 a |
| Suelo húmedo en tubos (g) | 299.11 a | 279.54 b | 275.96 b |
| Suelo seco en tubos (g) | 291.31 a | 265.87 b | 253.76 c |

¹ Medias seguidas por la misma letra son estadísticamente iguales a un nivel de significancia de 0.05. NTK = nitrógeno total Kjeldahl; CE = conductividad eléctrica.

Cuadro 5. Comparación de promedios para el factor dosis de estiércol a todos los niveles de los otros dos factores en estudio (texturas de suelo y tipo de agua) en las variables evaluadas, al final del experimento.

| Variable | Dosis de estiércol | |
|---|---|----------|
| | 0 | 50 |
| | - - - - - Mg ha ⁻¹ - - - - - | |
| P Olsen (mg kg ⁻¹) | 17.60 b ¹ | 41.58 a |
| NTK (mg kg ⁻¹) | 733.33 b | 981.44 a |
| CE (dS m ⁻¹) | 3.112 b | 3.773 a |
| pH | 8.36 a | 8.40 a |
| Densidad aparente (g cm ⁻³) | 1.31 a | 1.26 b |
| Humedad del suelo final (%) | 5.09 b | 6.52 a |

¹ Medias seguidas por la misma letra son estadísticamente iguales a un nivel de significancia de 0.05. NTK = nitrógeno total Kjeldahl; CE = conductividad eléctrica.

El tipo de agua de riego utilizada tuvo efecto significativo en la CE, al aumentar en promedio 0.41dS m⁻¹ cuando se utilizó agua negra o residual proveniente de las plantas de tratamiento. Los promedios de las demás variables evaluadas resultaron estadísticamente iguales, es decir, que el tipo de agua de riego no afectó las concentraciones de P y NTK en los tres tipos de suelo evaluados, ya que la densidad aparente y el contenido de humedad del suelo son variables muy poco influenciadas por el tipo de agua utilizado.

El Tratamiento 8 presentó, en promedio, la mayor concentración de P Olsen, corresponde a suelo franco

con estiércol (50 mg kg⁻¹) y agua negra. Por lo que el aumento coincide con las características del suelo franco, la adición de estiércol y el tipo de agua. Mientras que el tratamiento que mostró la menor concentración fue el 10, con la combinación de suelo franco-arenoso, sin estiércol y agua negra. Los tratamientos donde se registró mayor concentración de NTK fueron el 4 y el 5, que corresponden al tipo de suelo arcilloso, con estiércol y agua de la llave y agua negra, respectivamente; mientras que el Tratamiento 9, con suelo franco-arenoso, sin estiércol y agua de la llave, fue el más bajo. El pH más alto registrado fue para los suelos arcillosos y franco-arenosos, mientras que en el que se encontró con menor pH fue el Tratamiento 5, con suelo franco, sin estiércol y agua de llave (Cuadro 6).

La CE fue más alta en el Tratamiento 3 y 4, mientras que la más baja se presentó en el Tratamiento 9, franco-arenoso, sin estiércol y agua de llave. Las diferencias entre los suelos con y sin estiércol, en cuanto a la concentración de P Olsen, variaron de 20 a 33.6 mg kg⁻¹, al aplicarse 50 Mg ha⁻¹ de estiércol. El suelo arcilloso presentó una diferencia de 20 a 23.4 mg kg⁻¹ de P, quizás la aplicación del agua negra permitió agregar P a la solución del suelo. El suelo franco mostró una diferencia mayor, de 23.1 a 33.6 mg kg⁻¹ entre agua de la llave y agua negra, mientras que en el suelo franco-arenoso las diferencias entre el tratamiento sin estiércol y aquel con 50 Mg ha⁻¹ fueron de 23.9 y 22.1 mg kg⁻¹, cuando se irrigó con agua de la llave y agua residual, respectivamente. Estas concentraciones de P están en el rango de 0 a 30 mg kg⁻¹ de P para

Cuadro 6. Contenido de fósforo, nitrógeno total, pH y conductividad eléctrica de los suelos con diferente tratamiento.

| Tratamiento | Fósforo | Nitrógeno total Kjeldahl | pH | Conductividad eléctrica |
|----------------------------------|---|-----------------------------|--------|----------------------------|
| Suelo - estiércol - agua | - - - - - mg kg ⁻¹ - - - - - | | | dS m ⁻¹ |
| 1.- Arcilla - 0 - llave | 20.7 f ¹ | 832.6 cd | 8.40 a | 4.392 bc |
| 2.- Arcilla - 0 - negra | 17.5 f | 801.4 cd | 8.42 a | 4.176 bc |
| 3.- Arcilla - 50 - llave | 40.7 bc | 1140.0 a | 8.41 a | 4.600 ab |
| 4.- Arcilla - 50 - negra | 40.9 c | 1112.5 a | 8.45 a | 4.797 a |
| 5.- Franco - 0 - llave | 25.9 de | 933.6 bc | 8.22 c | 2.491 ef |
| 6.- Franco - 0 - negra | 26.4 e | 885.8 c | 8.35 b | 3.024 e |
| 7.- Franco - 50 - llave | 48.9 ab | 992.5 abc | 8.34 b | 3.312 de |
| 8.- Franco - 50 - negra | 60.0 a | 1089.3 ab | 8.36 b | 3.852 cd |
| 9.- Franco-arenoso - 0 - llave | 8.0 g | 457.7 e | 8.33 b | 2.140 f |
| 10.- Franco-arenoso - 0 - negra | 7.1 g | 488.6 e | 8.46 a | 2.448 ef |
| 11.- Franco-arenoso - 50 - llave | 31.9 d | 690.4 d | 8.46 a | 2.496 ef |
| 12.- Franco-arenoso - 50 - negra | 29.2 de | 861.9 c | 8.35 b | 3.582 de |

¹ Medias seguidas por la misma letra son estadísticamente iguales a un nivel de significancia de 0.05.

varios suelos reportados por Haney *et al.* (2008). La mayor retención de humedad y capacidad de intercambio iónico en los suelos arcilloso y franco puede explicar el aumento de P Olsen mineralizado, lo cual coincide con Watts *et al.* (2010) quienes indican que la textura y temperatura del suelo afectan la mineralización.

Aunque el coeficiente de correlación es relativamente bajo ($r^2 = 0.48$), en la Figura 3 se muestra que existe una tendencia de aumento en la concentración de P Olsen, a medida que se incrementa la concentración

de NTK en las 48 unidades experimentales evaluadas en este estudio. Esto indica que las aportaciones de materia orgánica, a través del estiércol, en suelos de texturas extremas (arenoso a arcilloso) y manejados con calidades de agua desde de la llave a residual, reflejan un aumento notable de la fertilidad de los suelos. La Figura 4 muestra una tendencia de disminución en el contenido de humedad en el suelo, a medida que aumenta la densidad aparente de los suelos. Esto es explicable por la naturaleza de los suelos franco-arenosos que se

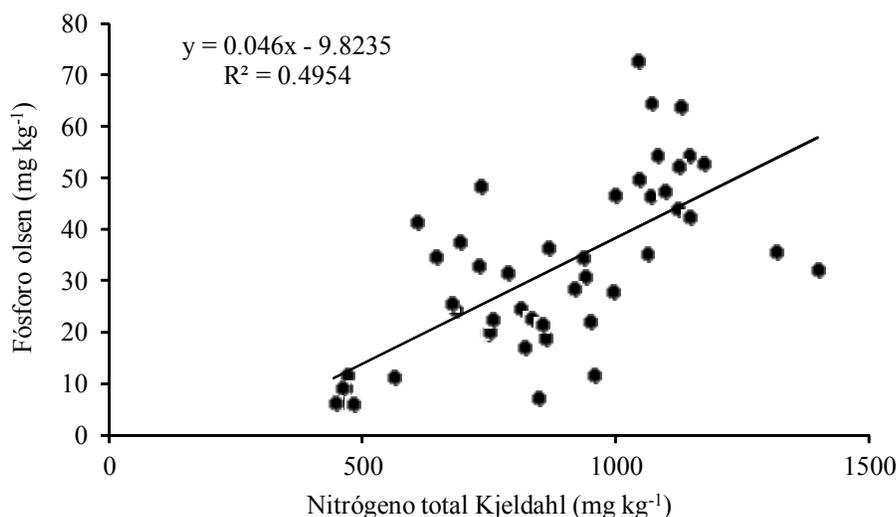


Figura 4. Correlación entre el contenido de nitrógeno total Kjeldahl y fósforo del suelo de los diferentes tratamientos.

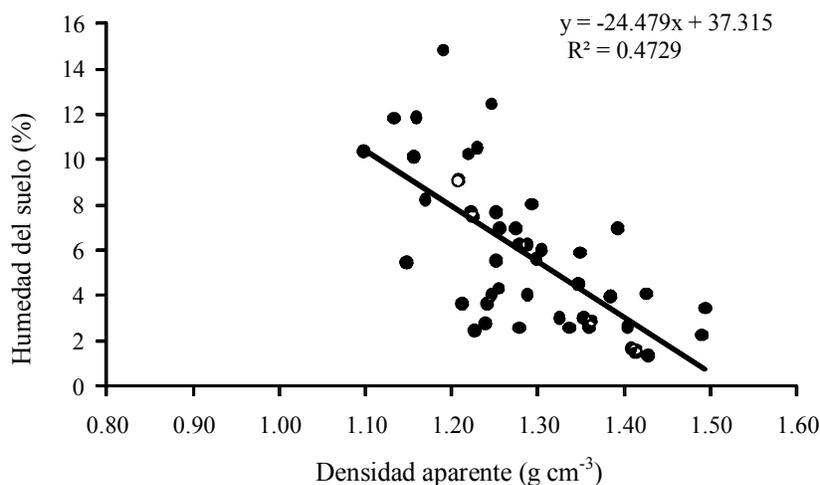


Figura 5. Correlación entre la densidad aparente y la humedad del suelo de los diferentes tratamientos.

Cuadro 7. Contenido de fósforo del estiércol mineralizado en el suelo durante 206 días de incubación en campo.

| Tipo de suelo | Dosis de estiércol | | Fósforo mineralizado + Fósforo en estiércol | Fósforo mineralizado neto |
|----------------|---------------------------------|------|--|---------------------------|
| | 0 | 50 | | |
| | ----- mg kg ⁻¹ ----- | | | |
| Arcilloso | 19.1 | 40.8 | 21.7 | 17.4 |
| Franco | 26.1 | 54.4 | 24.1 | 24.4 |
| Franco-arenoso | 7.5 | 30.5 | 23.0 | 18.7 |

caracterizan por retener menor humedad y presentar densidades aparentes altas (1.4 a 1.5 g cm⁻¹). Por el contrario, los suelos arcillosos retienen mucho la humedad al tener mayor porosidad, pesan menos y tienen densidades aparentes menores (1.1 a 1.2 g cm⁻¹), de tal manera que los suelos francos quedan intermedios en estas características físicas (Brady y Weil, 1996).

La cantidad de P mineralizado del estiércol fue similar entre los tipos de suelo (Cuadro 7). La adición de estiércol (50 Mg ha⁻¹) en los tres tipos de suelo estudiados (franco-arenoso, franco y arcilloso) causó un aumento del fósforo mineralizado en los 206 días de incubación, en condiciones de campo, en comparación con los tratamientos en los que no se agregó estiércol. El estiércol utilizado en este estudio tuvo 68.2 mg kg⁻¹ de P Olsen. Es decir, se aplicaron 1.16 mg P por cilindro (270 g suelo en promedio) o bien, 4.29 mg kg⁻¹, lo que correspondería (4.29 × 100 / 26.9 del suelo arcilloso) a 15.95% del fósforo inorgánico aplicado en el estiércol, el restante 84.05% fue fósforo orgánico del estiércol que se mineralizó, es decir 21.7 - 4.29 = 17.41 mg P kg⁻¹ suelo es la cantidad neta de P mineralizado.

A partir del P mineralizado neto que se indica en el Cuadro 7 y con el uso de la densidad aparente de cada tipo de suelo se calculó la cantidad de fósforo disponible para el cultivo (Cuadro 8). Por ejemplo, los cultivos de algodón y sorgo forrajero requieren 67 y 90 kg P ha⁻¹ (Havlin *et al.*, 1999) por lo que con la aplicación de 50 Mg ha⁻¹ de estiércol se podría satisfacer la demanda

de esos cultivos para los suelos del Valle de Juárez, Chihuahua. Flores *et al.* (2008) obtuvieron promedios de P Olsen que van desde 2.9 mg kg⁻¹, como mínimo, hasta 60.9 mg kg⁻¹; mientras que en la presente investigación se obtuvieron promedios de P mineralizado disponible para cultivo que van desde 78.8 mg kg⁻¹ hasta 87.5 mg kg⁻¹ que, de acuerdo con las demandas nutricionales de varios cultivos, se pueden considerar suelos con alto contenido en fósforo.

CONCLUSIONES

Los resultados del estudio muestran que la aplicación de estiércol y el tipo de suelo afectan la disponibilidad de P Olsen, pero no el tipo de agua, por lo que deben considerarse en los planes de manejo de los suelos para evitar excesos de este nutriente y problemas de salinidad. Los suelos analizados en el estudio fueron de textura franco-arenoso, franco y arcillosa; medianamente alcalinos, bajos en materia orgánica y en nitrógeno total Kjeldahl y medios en N inorgánico. Los suelos franco-arenoso y arcilloso fueron bajos en salinidad, mientras que el de textura franco fue salino. La conductividad eléctrica de los suelos aumentó con la aplicación de estiércol, en promedio, de 3.11 dS m⁻¹ a 3.77 dS m⁻¹; la humedad en el suelo mostró un aumento al final del experimento al agregar la dosis de estiércol de 50 Mg ha⁻¹, este fue de 5.09 a 6.52% en promedio. La mayor densidad aparente fue de 1.452 g cm⁻³ en el suelo

Cuadro 8. Contenido del fósforo disponible al cultivo (primavera - verano) para cada tipo de suelo.

| Tipo de suelo | Fósforo mineralizado neto | Densidad aparente | Profundidad de suelo | Fósforo disponible al cultivo |
|----------------|---------------------------|--------------------|----------------------|-------------------------------|
| | mg kg ⁻¹ | g cm ⁻³ | m | kg ha ⁻¹ |
| Arcilloso | 21.7 | 1.21 | 0.3 | 78.8 |
| Franco | 24.1 | 1.26 | 0.3 | 87.5 |
| Franco-arenoso | 23.0 | 1.39 | 0.3 | 83.5 |

Ejemplo: 1.21 g/cm³ × 0.3 m × 10000 m² / 1000 × 21.7 = 78.8.

arenoso sin estiércol e irrigado con agua de la llave. Los niveles de P Olsen detectados en el suelo al final del experimento (206 días de incubación) fueron de 40.8, 54.4 y 30.5 mg kg⁻¹ para los suelos arcilloso, franco y arenoso. Mientras que las concentraciones estimadas de P Olsen mineralizado neto fueron de 17.4, 24.4 y 18.7 mg kg⁻¹ para los mismos suelos. La estimación de P disponible a las plantas fue de 78.8, 87.5 y 84.5 kg ha⁻¹, para los suelos arcilloso, franco y arenoso.

LITERATURA CITADA

- Aceves, N. E. 2011. El ensalitramiento de los suelos bajo riego. Mundi Prensa, Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Acton, C. and R. Miller. 2009. SPSS for social scientists. Palgrave Macmillan. New York, NY, USA.
- Bouyoucos, J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.* 54: 464-465.
- Brady, N. C. and R. R. Weil. 1996. The nature and properties of soils. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Bremner, J. M. 1996. Nitrogen total. pp. 1035-1122. In: D. L. Sparks (ed.). *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods.* SSSA Book series No. 5. Madison, WI, USA.
- Cassman, K.G. and D.N. Munns. 1980. Nitrogen mineralization as affected by soil moisture, temperature, and depth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:1233-1237.
- Castellanos, J. Z., J. X. Uvalle y A. Aguilar S. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Instituto Nacional de Capacitación para la productividad Agrícola (INCAPA). Celaya, Gto., México.
- Celaya, M. H. y A. E. Castellanos V. 2011. Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana* 29: 343-356.
- Chardon, W. J. and O. F. Schoumans. 2007. Soil texture effects on the transport of phosphorus from agricultural land in river deltas of Northern Belgium, The Netherlands and North West Germany. *Soil Use Manage.* 23: 16-24.
- CIEPS S. C. (Consejo de Investigación y Evaluación de la Política Social, Servicios del Consejo). 1970. Estudio de factibilidad técnica, económica, social y financiera en la rehabilitación del Distrito de Riego. Tomo II. Anexo A. Secretaria de Recursos Hidráulicos. Estudio Geohidrológico del Valle de Juárez, Chihuahua, México.
- Correll, D. L. 1998. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *J. Environ. Qual.* 27:261-266.
- Dao, T. H. and M. A. Cavigelli. 2003. Mineralizable carbon, nitrogen, and water-extractable phosphorus release from stockpiled and composted manure and manure-amended soils. 2003. *Agron. J.* 95: 405-413.
- Day, P. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. pp. 545-567. In: C. A. Black (ed.). *Methods of soil analysis, part 1, number 9.* ASA Agronomy Series. Madison, WI, USA.
- Figuerola V., U., J. A. Delgado, J. A. Cueto W., G. Nuñez H., D. G. Reta S., and K. A. Barbarick. 2011. A new nitrogen index to evaluate nitrogen losses in intensive forage systems in Mexico. *Agric. Ecosyst. Environ.* 142: 352-264.
- Flores M., J. P., B. Corral D. y G. Sapien M. 2007. Mineralización de nitrógeno de biosólidos estabilizados con cal en suelos agrícolas. *Terra Latinoamericana* 25: 409-417.
- Flores M., J. P., V. Sotomayor V. y B. Corral D. 2008. Nitrógeno mineralizable de estiércol bovino lechero en suelo cultivado con algodónero. *Rev. Cienc. Tecnol. UACJ* 6: 119-131.
- Haney, R. L., W. H. Brinton, and E. Evans. 2008. Estimating soil carbon, nitrogen, and phosphorus mineralization from short-term carbon dioxide respiration. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 39: 2706-2720.
- Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale, and W. L. Nelson. 1999. *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management.* Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Jarvis, S. C., E. A. Stockdale, M. A. Shepherd, and D. S. Powlson. 1996. Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: Processes and measurement. *Adv. Agron.* 57: 187-235.
- Kalbasi, M. and G. Karthikeyan. 2004. Phosphorus dynamics in soils receiving chemically treated dairy manure. *J. Environ. Qual.* 33: 2296-2305.
- Koopmans, G. F., W. J. Chardon, and R. W. McDowell. 2007. Phosphorus movement and speciation in a sandy soil profile after long-term animal manure applications. *J. Environ. Qual.* 36: 305-315.
- Mulvaney, R. L. 1996. Nitrogen inorganic forms. pp. 1123-1184. In: D. L. Sparks (ed.). *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods.* SSSA Book series No 5. Madison, WI, USA.
- Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. pp. 961-1010. In: D. L. Sparks (ed.). *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods.* SSSA Book series No 5. Madison, WI, USA.
- Olivas, E. E., J. P. Flores M., M. Serrano A., E. Soto M., J. Iglesias O., E. Salazar S. y M. Fortis H. 2011. Indicadores fecales y patógenos en agua descargada al Río Bravo. *Terra Latinoamericana* 29: 449-457.
- Olsen, S. R. and L. E. Sommers. 1982. Phosphorus. pp. 403-430. In: A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2.* ASA, SSSA. Madison, WI, USA.
- Rhoades, J. D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. pp. 417-435. In: D. L. Sparks (ed.). *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods.* SSSA Book series No 5. Madison, WI, USA.
- Salas, A. M., E. T. Elliot, D. G. Westfall, C. V. Cole, and J. Six. 2003. The role of particulate organic matter in phosphorus cycling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 181-189.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1980. Soil survey of Dona Ana county area New Mexico. United States Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Watts, D. B., H. A. Torbet, and S. A. Prior. 2010. Soil property and landscape position effects on seasonal nitrogen mineralization of composted dairy manure. *Soil Sci.* 175: 27-35.