

Efecto de las enmiendas órgano minerales en la lixiviación de nitrógeno en dos inceptisoles

Effect of mineral organic amendments on nitrogen leaching in two inceptisols

Cindy Cynthia Elejalde Vargas ^{1,2}, Martha Constanza Daza Torres ^{1,3}.

¹Universidad del Valle. Cali, Colombia. ²✉ cindy.elejalde@correounivalle.edu.co, ³✉ martha.daza@correounivalle.edu.co



<https://doi.org/10.15446/acag.v70n4.73962>

2021 | 70-4 p 338-344 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 02-08-2018 Acep.: 26-10-2021

Resumen

Se evalúa la aplicación de enmiendas órgano-minerales (EOM) en la lixiviación de nitrógeno (N) en un suelo *Andic Dystrudepts* ácido, y en un *Fluventic Haplusteps* básico, usando lisímetros de drenaje. Los tratamientos son: testigo, lombricompost, gallinaza, montmorillonita, 3 proporciones de mezcla entre lombricompost y montmorillonita (LP), y 3 proporciones de mezcla entre gallinaza y montmorillonita (GP); las proporciones son diferentes para cada suelo. En el suelo ácido las proporciones varían entre 0.64:1 y 1.25:1; en el básico, entre 0.82:1 y 1.25:1, correspondiendo a la relación abono orgánico: montmorillonita. Cada tratamiento fue fertilizado con urea (46.0 %) a una dosis de 150 kg/ha de N. La aplicación de EOM redujo significativamente las pérdidas de agua y la lixiviación de amonio y nitrato, siendo más evidente en el suelo ácido y en los tratamientos con lombricompost. El tratamiento LP2 (1.2:1) reduce la pérdida de agua en un 53.7 %, amonio en 96.5 %, y nitrato en un 32.3 % en el suelo ácido; mientras que, en el suelo básico, el tratamiento LP3 (1.22:1) reduce la lixiviación de amonio en un 55.1 % y la pérdida de agua en un 42.0 %; el tratamiento GP3 (0.97:1), reduce en un 57.1 % la lixiviación de amonio, y en un 65.0 % la de nitrato.

Palabras clave: Gallinaza, lombricompost, montmorillonita, suelo ácido, suelo básico.

Abstract

The application of organo-mineral amendments (EOM) in nitrogen (N) leaching in an acidic *Andic Dystrudepts* soil, and in a basic soil, *Fluventic Haplusteps*, using drainage lysimeters was evaluated. The treatments were: Control, vermicompost, poultry manure, montmorillonite, 3 mixing proportions between vermicompost and montmorillonite (LP), and 3 mixing proportions between poultry manure and montmorillonite (GP); the proportions were different for each soil. In acidic soil the proportions varied between 0.64: 1 and 1.25: 1, in the basic, between 0.82: 1 and 1.25: 1, corresponding to the organic fertilizer: montmorillonite. Each treatment was fertilized with urea (46.0 %) at a dose of 150 kg/ha of N. The application of EOM significantly reduced water losses and the leaching of ammonium and nitrate, being more evident in the acid soil and in treatments with vermicompost. The LP2 treatment (1.2: 1) reduced the loss of water by 53.7 %, ammonium by 96.5 %, and nitrate by 32.3 % in the acid soil; while in the basic soil, the LP3 (1.22: 1) treatment reduced ammonium leaching by 55.1 % and water loss by 42.0 %. The GP3 treatment (0.97: 1), reduced ammonium leaching by 57.1 %, and nitrate leaching by 65.0 %.

Keywords: acidic soil, basic soil, montmorillonite, poultry manure, vermicompost.

Introducción

En Colombia, alrededor del 70.0 % del N aplicado al suelo se pierde principalmente por lixiviación (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2009), lo que ocasiona problemas ambientales relacionados con el recurso hídrico.

La mayoría de los suelos retienen con mayor facilidad los cationes; por tanto, aniones como nitrito y nitrato son lixiviados regularmente del medio. Por el contrario, el amonio (catión) puede ser retenido en el complejo de cambio o puede ser fijado en las entrecapas estructurales de los minerales de arcilla 2:1, para luego ser liberado e iniciar el proceso de nitrificación (Navarro García y Navarro García, 2013).

Gran parte de la lixiviación de N se debe a la degradación estructural y pérdida de materia orgánica del suelo (MOS), ocasionada por la labranza intensiva y aplicación de riego excesivo, que disminuye la capacidad de retención de amonio y nitrato (FAO, 2015).

En este panorama se hace necesario buscar nuevas alternativas que permitan mejorar las propiedades del suelo y aumentar su capacidad de retención de N. Recientemente se vienen estudiando las enmiendas inorgánicas como los minerales de arcilla, y orgánicas, como los abonos. Si bien las enmiendas orgánicas han mejorado la retención y liberación de N en el suelo, no han reducido de manera significativa las pérdidas por lixiviación (Forge *et al.*, 2016). Las EOM (mezcla entre material orgánico y minerales de arcilla) han surgido como una nueva estrategia para el mejoramiento de propiedades de los suelos, gracias a que elevan la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y la retención de agua (Leggo *et al.*, 2006) y su uso aporta al manejo eficiente de N y a la reducción de la contaminación del agua, así como al mejoramiento de las propiedades de los suelos.

Las EOM se fundamentan en los complejos órgano-minerales, los cuales son compuestos generados a partir de la adherencia de las sustancias húmicas a los minerales de arcilla, que ocurre normalmente en los suelos. Las sustancias húmicas están compuestas por grupos carboxílicos y fenólicos que, al unirse con los minerales arcillosos y dependiendo del pH, saturan las cargas positivas de éstos formando el complejo. Los grupos orgánicos mencionados pueden unirse a cationes presentes en el medio, formando un enlace entre un radical orgánico negativo y un mineral de arcilla negativo (Das *et al.*, 2019; Chotzen *et al.*, 2016).

Abonos como el compost, la gallinaza, el lombricompost y el estiércol son los más utilizados para el componente orgánico de las EOM, ya que mejoran los procesos de nitrificación y desnitrificación en el suelo, aportan amoníaco y nitratos y mejora la nutrición de las plantas (Agegnehu *et al.*, 2016). En cuanto a la fracción mineral, la zeolita se ha destacado debido a su eficiencia en el uso del N en el suelo,

gracias a su alta CIC y a su estructura cristalina, por lo tanto, ha sido útil en la reducción de la lixiviación de nitratos debido a la retención de humedad y del amonio (Gholamhoseini *et al.*, 2013;). Por su parte, el uso de la bentonita en la agricultura se ha orientado hacia su efecto sobre el uso eficiente del N en viarios suelos (Shen *et al.*, 2020; Chu *et al.*, 2020), y en propiedades químicas en suelos salino-sódicos (Shaygan *et al.*, 2017)

En Colombia, poco se ha evaluado la aplicación de EOM para el mejoramiento de las propiedades físicas y químicas del suelo; las investigaciones se han enfocado a la utilización de zeolita (Obregón-Portocarrero *et al.*, 2016). Por lo anterior, como hipótesis se plantea que la aplicación de EOM, como la montmorillonita como fracción mineral, y lombricompost y gallinaza como fracción orgánica, a dos inceptisoles de las zonas plana y de ladera del Valle del Cauca, reducirá la lixiviación de N y, a su vez, la pérdida de agua; además de mejorar las propiedades físicas y químicas de ambos suelos. Por tanto, el objetivo es evaluar la aplicación de EOM en la disminución de la lixiviación de N en dos inceptisoles.

Materiales y métodos

La investigación se lleva a cabo en el invernadero del Laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas (LASA) de la Universidad del Valle, ubicado en el municipio de Santiago de Cali, Valle del Cauca, a 979 msnm, 3°22'22,29" N y 76°31'49,22" O. La temperatura y precipitación promedio anual es de 25°C y 909 mm, respectivamente. Los suelos utilizados se clasifican taxonómicamente como *Andic Dystrudepts* ácido (N 3° 37' W 76° 37') y *Fluventic Haplustepts* básico (N 3° 26' W 76° 27') (IGAC y CVC, 2004).

El suelo ácido tiene una textura franco arcillo arenosa, pH fuertemente ácido, alto contenido de MOS, alto contenido de N total y alta CIC, originario del Corregimiento El Palmar, municipio de Dagua. El suelo básico presenta pH neutro, textura arcillosa, porcentaje de N alto, MOS medio, y alta CIC, proveniente de la vereda Caucaseco, municipio de Candelaria (Fernandez 2006; Porta *et al.*, 2014) (Tabla 1).

Las EOM se elaboraron a partir de lombricompost y gallinaza como componentes orgánicos y la bentonita cálcica (Montmorillonita) proveniente de Tuluá-Valle del Cauca, como componente mineral. El lombricompost tuvo como materia prima estiércol de vaca (95.0 %) y residuos de cocina (5.0 %). La gallinaza fue producto del compostaje de la mezcla de estiércol de aves de corral con aserrín (Tabla 2).

Se realiza un diseño experimental completamente al azar estableciendo 9 tratamientos y un testigo por suelo, con tres repeticiones cada uno. Los tratamientos consisten en tres proporciones de mezcla entre lombricompost y montmorillonita para el suelo ácido (LP1: 1:1; LP2: 1.2:1; LP3: 1.25:1),

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica inicial de los suelos utilizados en el experimento

Propiedad	Resultado	
	Suelo ácido	Suelo básico
Textura (%)	Ar: 55.18, A: 22.82, L: 22.00	Ar: 23.18, A: 42.82, L: 34.00
Humedad a capacidad de campo (%)	29.65	45.95
Porosidad (%)	66.02	49.26
Densidad real (g/cm ³)	2.59	2.72
Densidad aparente (g/cm ³)	0.88	1.38
pH (1:1)	5.11	6.85
Materia Orgánica (%)	7.02	2.69
Nitrógeno Total (%)	0.18	0.28
Capacidad de Intercambio Catiónico (cmol (+) /kg)	23.80	28.40

Tabla 2. Caracterización inicial de los abonos orgánicos y el mineral de arcilla, utilizados en el experimento

Propiedad	Lombricompost	Gallinaza	Montmorillonita
Humedad (%)	67.60	21.90	10.10
pH	6.58	9.63	9.18
Materia Orgánica (%)	20.00	23.65	0.00
Nitrógeno Total (%)	1.00	1.50	0.06

para el suelo básico (LP1: 1.20:1; LP2: 1.25:1; LP3: 1.22:1); tres proporciones de mezcla entre gallinaza y montmorillonita para el suelo ácido (GP1: 0.64:1; GP2: 0.79:1; GP3: 0.87:1), para el suelo básico (GP1: 0.82:1; GP2: 0.86:1; GP3: 0.97:1); solo lombricompost (Lom), solo gallinaza (Gal), solo montmorillonita (Mon), y control (Control). Cada tratamiento, dependiendo del tipo de suelo, tiene 3.0 kg de suelo ácido, o 4.1 kg de suelo básico, y urea (150 kg/ha de N). Las proporciones de enmienda fueron establecidas tomando como referencia las investigaciones de Gholamhoseini *et al.* (2013) y Leggo *et al.* (2006). Al tratamiento Control solo se le adiciona urea.

Los lisímetros de drenaje consisten en columnas de policloruro de vinilo (PVC) de 35 cm x 15.2 cm unidas con silicona a embudos plásticos. En la parte superior e inferior de cada columna se acopla una placa plástica con perforaciones múltiples de 6.3 mm para garantizar la uniformidad del riego y la recolección completa del lixiviado. El embudo condujo el líquido hacia una manguera de polietileno para riego de 2.5 cm de diámetro conectada a recipientes plásticos con capacidad de 200 mL, que a su vez se disponen dentro de recipientes plásticos de 11 litros evitando el contacto con la luz y la pérdida de lixiviado en caso de derrame. Entre el suelo y la placa perforada inferior se adiciona una capa de 2 cm de grava gruesa para evitar la pérdida del suelo. Los lisímetros se soportaron con bases construidas con ángulos de acero de 2.5 cm, a 80 cm del suelo.

Dentro del lisímetro, los materiales se distribuyen así: 2 cm de grava en la base, suelo tamizado por 2 mm, EOM mezclada con los primeros 10 cm de suelo a capacidad de campo, y el fertilizante. Los materiales de la EOM fueron mezclados entre sí antes de mezclarlos con el suelo.

Durante la fase experimental (100 días) se hace seguimiento a la humedad gravimétrica dos veces por semana, con el fin de mantener el suelo a capacidad de campo, cuyo valor es de 29.65 % para el suelo ácido, y 45.95 % para el suelo básico. El riego depende exclusivamente del balance hídrico, en el que se utiliza un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.24 (M. Daza *et al.*, 2017) como referencia y un factor de tanque de 0.75 (Allen, 2006). Se aplican 4265.6 mL de agua en total.

Se registra el volumen semanal y total lixiviado de cada tratamiento. Los lixiviados son almacenados a 4 °C hasta la determinación de amonio y nitrato por el método Kjeldahl modificado y extracción por cloruro de potasio 2N y cuantificación potenciométrica (Instituto Geográfico “Agustín Codazzi”, 2006).

Se realiza un balance de N de los lixiviados. Como entradas se tienen en cuenta el fertilizante urea, el lombricompost, la gallinaza y la montmorillonita. La estimación del N total (kg/ha) en los materiales de las enmiendas se realiza utilizando ecuación 1 (Navarro García y Navarro García, 2013):

$$TA = \left[\left(\frac{\%N}{100} \right) / A \right] * 0,05 \text{ Ec. 1}$$

Donde: TA: cantidad aplicada (kg); % N: porcentaje de N; A: área del cilindro (ha). El valor obtenido se multiplica por 0.05 para estimar el N asimilable. Debido a que el agua de riego era potable, el N en ella se considera despreciable. Las concentraciones de amonio (mg/kg) y nitrato (mg/kg) se multiplicación por la suma del peso del suelo (kg) y la EOM (kg) en el lisímetro, dividido por el área del lisímetro (ha) y, multiplicado finalmente por 1×10^{-6} para obtener las cantidades de cada tratamiento en kg/ha.

Al finalizar el experimento se toman muestras de suelo de cada lisímetro a una profundidad de 5 cm desde la superficie, las cuales son secadas en horno a 105 °C y tamizadas para obtener partículas de 2 mm. Se determina humedad a capacidad de campo por método de tensión, densidad aparente por método del cilindro, pH por Potenciómetro relación 1:1 y N total por método Kjeldahl (IGAC, 2006).

La distribución normal de los datos se verifica por medio del gráfico q-q. También se realiza un análisis de homogeneidad de varianzas por Levene. Las diferencias significativas entre tratamientos se

establecen por la prueba de Tukey, con un nivel de confianza del 95.0 %. Se utilizó el programa estadístico R 3.3.2 (R Core Team, 2015).

Resultados y discusión

Volumen lixiviado. La pérdida de agua respecto al total aplicado varía entre 1.2 % (LP2) y 31.5 % (Gal) en el suelo ácido, y en el básico, entre 2.2 % (LP3) y 36.4 % (Gal) (Tabla 3). El tratamiento LP3 (1.22:1) del suelo básico es el único tratamiento inferior al Control (3.8 %); y en el ácido, los tratamientos LP2 (1.2:1) (1.24 %) y LP3 (1.25:1) (2.4 %) lixiviaron menos que el Control (2.6 %). Esto permite observar la influencia de la enmienda sobre el volumen de agua lixiviado.

Tabla 3. Volúmenes totales lixiviados de los tratamientos aplicados a los suelos (Duración: 100 días)

Tratamiento	Riego (mL)	Volumen total lixiviado (mL)			
		Suelo ácido	% Lixiviado	Suelo básico	% Lixiviado
Control		114.5 ^c	2.7	106.3 ^c	2.5
Lom		259.6 ^c	6.1	214.3 ^c	5.0
Gal		1343.0 ^c	31.5	1556.6 ^a	36.5
Mon		66.1 ^c	1.5	7.0 ^c	0.2
LP1	4265.6	187.3 ^c	4.4	184.0 ^c	4.3
LP2		53.0 ^c	1.2	222.3 ^c	5.2
LP3		103.0 ^c	2.4	95.6 ^c	2.2
GP1		859.3 ^b	20.1	867.3 ^b	20.3
GP2		907.6 ^b	21.3	934.3 ^b	21.9
GP3		703.0 ^b	16.5	837.0 ^b	19.6

Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tuckey ($P < 0.05$).

En el suelo ácido, la estructura de los suelos con EOM con lombricompost es migajosa, mientras que en los que tuvieron gallinaza se forman agregados pequeños y medianos; en el suelo básico hay agregados grandes. El tamaño de los agregados se incrementa a medida que la cantidad de EOM aumenta. La formación de los agregados es evidente cada vez que se aplica el riego. El cambio en la macroestructura del suelo, sumado a que únicamente los 10 primeros centímetros del suelo se removieron regularmente, contribuyen a la formación de flujos preferenciales en los tratamientos con EOM con gallinaza, lo cual produce un mayor volumen de lixiviado. En el suelo básico, su textura y las características expansivas del mineral potenciaron la creación de flujos preferenciales (Daza *et al.*, 2015).

La densidad aparente (D_a) es otra propiedad a la cual se le atribuye la baja lixiviación en los suelos con lombricompost, ya que se relaciona de manera inversa con la retención de humedad (Daza *et al.*, 2014). Los tratamientos con lombricompost presentaron densidades más bajas que los tratamientos con gallinaza (Tabla 4), lo cual concuerda con los volúmenes de lixiviación encontrados y la estructura formada al mezclar las EOM con cada uno de los suelos.

Es posible que el lombricompost, al tener características de un material estable a diferencia de la gallinaza, haya tenido mayor porcentaje de materia orgánica humificada debido a la degradación ejercida por las lombrices. Así, el lombricompost incrementa la porosidad del suelo aumentando la capacidad de retención de agua, gracias a los grupos carboxílicos presentes en las sustancias húmicas y a sus propiedades coloidales (Adhikary, 2012).

El suelo ácido con los tratamientos LP1 (1:1), LP2 (1.2:1) y LP3 (1.25:1) presentan valores de pH cercanos al rango óptimo para la disociación de los ácidos húmicos y fúlvicos (6.4–6.7), responsables de la retención de agua en el suelo, a diferencia del

Tabla 4. Humedad a capacidad de campo (Hcc), Densidad aparente (D_a), pH y Nitrógeno Total (NT) de los suelos para los diferentes tratamientos al finalizar el experimento

Tratamiento	Hcc (%)		D_a (g/cm ³)		pH		NT (%)	
	A	B	A	B	A	B	A	B
Control	54.60 ^{ab}	32.90 ^b	0.88	1.30	4.61 ^e	6.08 ^f	0.05 ^{bc}	0.08 ^{ns}
Lom	67.70 ^a	64.10 ^a	0.70	0.86	5.63 ^d	6.59 ^e	0.47 ^a	0.11 ^{ns}
Gal	51.10 ^{ab}	32.70 ^b	0.94	1.37	7.92 ^a	8.43 ^a	0.16 ^b	0.04 ^{ns}
Mon	53.30 ^{ab}	31.60 ^b	0.93	1.41	6.46 ^c	7.71 ^c	0.03 ^c	0.06 ^{ns}
LP1	54.00 ^{ab}	39.10 ^b	0.87	1.31	5.86 ^d	7.16 ^d	0.07 ^{bc}	0.10 ^{ns}
LP2	51.30 ^{ab}	39.20 ^b	0.93	1.25	6.03 ^d	6.99 ^d	0.16 ^{bc}	0.03 ^{ns}
LP3	58.20 ^{ab}	38.90 ^b	0.90	1.26	6.04 ^d	7.13 ^d	0.11 ^{bc}	0.05 ^{ns}
GP1	49.90 ^b	34.50 ^b	0.98	1.37	7.27 ^b	7.80 ^{bc}	0.13 ^{bc}	0.06 ^{ns}
GP2	49.40 ^b	36.90 ^b	1.01	1.30	7.41 ^b	7.87 ^{bc}	0.13 ^{bc}	0.07 ^{ns}
GP3	50.40 ^{ab}	34.20 ^b	0.97	1.36	7.57 ^{ab}	8.07 ^{bc}	0.04 ^{bc}	0.12 ^{ns}

Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tuckey ($P < 0.05$). ns: diferencias estadísticas no significativas. **A:** Suelo ácido, **B:** Suelo básico.

tratamiento Lom, lo cual pudo ocasionar que los tratamientos con EOM perdieran menos agua. Por otro lado, el tratamiento Gal, al tener un pH superior al de los tratamientos con EOM de su mismo grupo, tiene mayores pérdidas de agua, ya a pH superiores a 7 hay presencia de grupos carboxilo disociados aunque débiles (Porta *et al.*, 2014) (Tabla 4).

Debido al pH que presentan los suelos con EOM con lombricompost, es posible que se hayan formado complejos arcillo-húmicos con cationes como el hierro y el calcio en ambos suelos (Porta *et al.*, 2014). La coloración oscura de los lixiviados de los tratamientos con gallinaza sugiere la presencia de ácidos húmicos (Arias *et al.*, 2010); por tanto, es posible que se formaran complejos, aunque débiles.

Por otro lado, los suelos tratados mantienen su humedad durante varias semanas después de finalizar el experimento, lo cual puede deberse a la translocación de arcillas y materia orgánica, que en el caso del suelo básico se hace evidente al desmontar las columnas, puesto que se encuentra un horizonte con características similares a un argílico. La humedad a capacidad de campo de los suelos es mayor en el grupo lombricompost que en el de gallinaza.

Los suelos básicos de los tratamientos GP1, GP2 y GP3 presentan un color verde azulado característico de la reducción del hierro al someterse a periodos de

saturación y desecación de agua (Porta *et al.*, 2014), posiblemente porque el riego depende de la humedad del suelo y la lámina a aplicar diaria.

Lixiviación de amonio y nitrato. Con los tratamientos LP2 y GP3 (del suelo ácido se disminuye la lixiviación de amonio en un 96.5 % y 93.1 % frente al Control, y en un 97.8 % y 86.9 % frente a los tratamientos Lom y Gal, respectivamente; mientras que en el suelo básico los tratamientos LP3 y GP3 lo hacen en un 55.1 % y 57.1 % frente al Control, y en un 56.8 % y 50.0 % frente a los tratamientos Lom y Gal respectivamente. Lo anterior se asocia a la retención de amonio de la montmorillonita, gracias a su CIC y espacio interlamilar (Yao *et al.*, 2014). Los tratamientos con gallinaza evidencian que a mayor proporción de EOM, hay menor lixiviación de amonio (Tabla 5).

El pH influye significativamente sobre la lixiviación de amonio; los tratamientos con lombricompost del suelo ácido tienen un pH inferior al rango óptimo para la absorción del ion y el proceso de nitrificación (6.9–7.5), lo cual probablemente facilita la lixiviación. Además, la poca lixiviación de amonio en los tratamientos con gallinaza del suelo básico puede deberse a que a pH superiores a 7.5 la tasa de conversión de amonio a nitrito es alta (Navarro García y Navarro García, 2013).

Tabla 5. Entradas y salidas de Nitrógeno de los suelos tratados con las diferentes enmiendas

Suelo	Tto	Entrada de N (kg/ha)	Salidas de N (kg/ha)			
			N-NH ₄ ⁺	% reducción	N-NO ₃ ⁻	% reducción
Ácido	Control	7.50	8.80 ^a	0.00	6.89 ^{ab}	0.00
	Lom	528.29	14.13 ^a	-60.57	19.51 ^a	-183.16
	Gal	562.55	4.69 ^{ab}	46.70	6.68 ^{ab}	3.05
	Mon	34.87	0.00 ^b	100.00	0.00 ^b	100.00
	LP1	173.56	6.37 ^{ab}	27.61	8.00 ^{ab}	-16.11
	LP2	238.53	0.31 ^b	96.48	4.66 ^b	32.37
	LP3	281.58	2.05 ^{ab}	76.70	5.60 ^b	18.72
	GP1	165.34	3.37 ^{ab}	61.70	4.32 ^b	37.30
	GP2	237.16	2.81 ^{ab}	68.07	5.57 ^b	19.16
	GP3	300.77	0.60 ^b	93.18	6.93 ^{ab}	-0.58
Básico	Control	7.50	4.93 ^a	0.00	3.53 ^{ns}	0.00
	Lom	478.95	5.14 ^a	-4.26	1.93 ^{ns}	45.33
	Gal	509.10	4.27 ^{ab}	13.39	1.73 ^{ns}	50.99
	Mon	32.23	0.00 ^b	100.00	0.00 ^{ns}	100.00
	LP1	186.39	6.34 ^a	-28.60	6.99 ^{ns}	-98.02
	LP2	221.04	6.74 ^a	-36.71	9.73 ^{ns}	-175.64
	LP3	255.68	2.24 ^{ab}	54.56	7.10 ^{ns}	-101.13
	GP1	189.13	5.59 ^{ab}	-13.39	3.06 ^{ns}	13.31
	GP2	236.1	3.35 ^{ab}	32.05	3.47 ^{ns}	1.70
	GP3	303.65	2.05 ^{ab}	58.42	1.45 ^{ns}	58.92

Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tuckey (P < 0.05). ns: diferencias estadísticas no significativas. Tto: Tratamiento.

No se encuentran diferencias significativas en la lixiviación de nitrato de los tratamientos con EOM, a pesar de que en el suelo básico los tratamientos del grupo lombricompost tienen mayores pérdidas que el grupo gallinaza. No obstante, en el suelo básico los tratamientos GP3, Gal y Lom presentan las lixiviaciones más bajas, 1.4 kg/ha, 1.7 kg/ha y 1.9 kg/ha respectivamente; mientras que en el ácido son los tratamientos LP2 (4.6 kg/ha) y GP1 (4.3 kg/ha). Además, los tratamientos LP2, LP3, GP1, GP2 y Mon, pierden menos de 8.0 kg/ha de nitrato, siendo significativamente diferentes al tratamiento Lom (19.5 kg/ha).

La baja lixiviación de nitrato de los tratamientos con EOM posiblemente se deba a la retención del amonio ejercida por el mineral de arcilla, que favorece su liberación lenta (Shen *et al.*, 2020), al riego, que según Marcano (2010), puede estimular la conversión de la MOS en amonio con mayor velocidad que la lixiviación del nitrato resultante, y a la acumulación de nitrato en el perfil del suelo. En los tratamientos con gallinaza del suelo básico, la poca lixiviación de nitrato puede deberse al pH, ya que la tasa de transformación de nitrito a nitrato se reduce, por lo que el nitrito se acumula y el nitrato disminuye (Navarro García y Navarro García, 2013).

En resumen, en el suelo ácido, el tratamiento LP2 reduce la pérdida de agua en un 53.7 %, amonio en 96.5 %, y nitrato en un 32.3 % frente al Control. El suelo ácido con tratamientos de gallinaza presenta mayores pérdidas de agua que el Control, sin embargo, el tratamiento GP3 logra reducir la lixiviación de amonio en un 93.1 %, y el tratamiento GP1 reduce la lixiviación de nitrato en un 36.7 %.

Los tratamientos Lom y Gal del suelo ácido presentan mayores cantidades de amonio y nitrato en sus lixiviados respecto a los tratamientos con EOM. Los tratamientos con EOM que contenía lombricompost muestran valores variables. No obstante, estas diferencias pueden obedecer al pH, puesto que el rango en el que la absorción de amonio y nitrificación ocurren rápidamente está entre 6.9 y 7.5, aunque puede ocurrir entre 5.5 y 8.0. Por otro lado, a pH superiores a 7.5 la tasa de conversión de amonio a nitrito es alta (Navarro García y Navarro García, 2013). Lo anterior, en el suelo ácido, probablemente facilita la lixiviación de amonio en los tratamientos con lombricompost debido a que presentan un pH inferior a los rangos mencionados.

En el suelo básico, los tratamientos con lombricompost LP3 y gallinaza GP3 presentan las pérdidas de nitrógeno y agua más bajas en su respectivo grupo de abono; sin embargo, el suelo con el tratamiento LP3 lixivia mayor cantidad de nitrato que el Control, y el tratamiento GP3 supera al Control en pérdida de agua. De esta forma, el tratamiento LP3 reduce la lixiviación de amonio en un 55.1 % y la pérdida de agua en un 42.0 %; mientras que el tratamiento GP3 reduce en un 57.1 % la lixiviación de amonio, y en un 65.0 % la de nitrato.

Los tratamientos Lom y Gal del suelo básico lixivian menores cantidades de amonio y nitrato que el Control y sus respectivos tratamientos con EOM, contrario a Gholamhoseini *et al.* (2013), quienes encontraron que la mezcla de zeolita y abono orgánico lixivian menores concentraciones de amonio que la aplicación única de abono orgánico al suelo, además presenta mejores resultados a medida que aumenta la proporción de la mezcla.

Los tratamientos Control, Lom, Gal, GP1 y GP3, del suelo básico presentan problemas en la nitrificación al lixiviar mayores concentraciones de amonio que de nitrato, lo cual se le atribuye al exceso de humedad (Gonzalez y Sadeghian, 2012) debido a la frecuencia de riego, y a los pH fuera del rango óptimo para la nitrificación.

Conclusiones

Las enmiendas órgano-minerales favorecen la retención de agua y amonio en ambos suelos, sin embargo, el suelo ácido muestra mayores porcentajes de nitrógeno total en la muestra final. La mezcla de lombricompost y montmorillonita es más efectiva en la retención de agua a diferencia de la mezcla entre gallinaza y montmorillonita, aunque lixivian mayores concentraciones de amonio y nitrato. En el suelo básico la frecuencia de riego y el pH afectan el proceso de nitrificación evidenciando mayor lixiviación de amonio que de nitrato. Además, los tratamientos de EOM con gallinaza registran que, a mayor proporción de enmienda, hay menor lixiviación de amonio.

La mezcla entre lombricompost y montmorillonita en el suelo ácido propicia la retención de agua debido al pH y la posible formación de complejos órgano-minerales, la baja densidad aparente, y la macroestructura migajosa que presenta en comparación con los tratamientos que tuvieron gallinaza, en los que se forman agregados grandes que contribuyen a la formación de flujos preferenciales.

La formación de complejos órgano minerales se ve favorecida por el tipo de abono orgánico, la estructura de la enmienda órgano-mineral, el pH, y el mineral de arcilla; estos factores influyen significativamente en la reducción de las pérdidas de agua.

Referencias

- Adhikary, S. (2012). Vermicompost, the story of organic gold: A review. *Agricultural Sciences*, 3(7), 905-917. https://file.scirp.org/pdf/AS20120700004_32428995.pdf
- Agegehu, G., Nelson, P.N. y Bird, M.I. (2016). Crop yield, plant nutrient uptake and soil physicochemical properties under organic soil amendments and nitrogen fertilization on Nitisols. *Soil and Tillage Research*, 160, 1-13. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198716300149>
- Allen, R.G. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. 56). FAO.

- Arias-Suárez, E., Sadeghian-Kahalajabadi, S., Mejía-Muñoz, B. y Morales, C. (2010). Lixiviación del nitrógeno en algunos suelos de la zona cafetera y su relación con la textura. *Cenicafé*, 60(3), 239-252. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/154/1/arc060%2803%29239-252.pdf>
- Chotzen, R.A., Polubesova, T., Chefetz, B., y Mishael, Y.G. (2006). Adsorption of soil-derived humic acid by seven clay minerals: a systematic study. *Clays and Clay minerals*, 64(5), 628-638. <https://link.springer.com/article/10.1346/CCMN.2016.064027>
- Chu, Q., Xu, S., Xue, L., Liu, Y., Feng, Y., Yu, S., Yang, L. y Xing, B. (2020). Bentonite hydrochar composites mitigate ammonia volatilization from paddy soil and improve nitrogen use efficiency. *Science of the Total Environment*, 718, 137301. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720308111>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2009). *Política nacional para la racionalización del componente de costos de producción asociados a los fertilizantes en el sector agropecuario*. Bogotá, D.C.
- Das, R., Purakayastha, T J., Das, D., Ahmed, N., Kumar, R., Biswas, S., Walia, S.S., Singh, R., Shukla, V. K., Yadava, M.S., Ravisankar, N., y Datta, S.C. (2019). Long-term fertilization and manuring with different organics alter stability of carbon in colloidal organo-mineral fraction in soils of varying clay mineralogy. *Science of the total environment*, 684, 682-693. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719323745>
- Daza-Torres, M.C., Meneses-Carvajal, H.S., Reyes-Trujillo, A. y Urrutia-Cobo, N. (2017). Necesidades hídricas de Estevia en el suroccidente colombiano calculadas con el coeficientes del Cultivo. *Revista Agronomía Mesoamericana*, 28(2), 509-521. https://www.redalyc.org/pdf/437/Resumenes/Resumen_43750618015_1.pdf
- Daza, M.C., Florez, F.H., y Triana, F.A. (2014). Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el páramo de Sumapaz-Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(1), 7189-7200. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472014000100006
- Daza, M.C., Díaz, J., Aguirre, E. y Urrutia, N. (2015). Efecto de abonos de liberación lenta en la lixiviación de nitratos y nutrición nitrogenada en estevia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 9(1), 112-123. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2011-21732015000100010
- FAO. (Abril 15, 2022). ¿Qué es la agricultura de conservación?. <http://www.fao.org/ag/ca/es/la.html>
- Fernández, L.C. (2006). *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. Instituto Mexicano del Petróleo.
- Forge, T., Kenney, E., Hashimoto, N., Neilsen, D. y Zebarth, B. (2016). Compost and poultry manure as preplant soil amendments for red raspberry: Comparative effects on root lesion nematodes, soil quality and risk of nitrate leaching. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 223, 48-58. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880916301141>
- Gholamhoseini, M., Ghalavand, A., Khodaei-Joghan, A., Dolatabadian, A., Zakikhani, H. y Farmanbar, E. (2013). Zeolite-amended cattle manure effects on sunflower yield, seed quality, water use efficiency and nutrient leaching. *Soil and Tillage Research*, 126, 193-202. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198712001626>
- González Osorio, H. y Sadeghian Khalajabadi, S. (2012). Lixiviación de nitrógeno en suelos de la zona cafetera a partir de diferentes fuentes fertilizantes. *Cenicafé*, 63, 11-119. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/516/1/arc063%281%29111-119.pdf>
- IGAC y CVC. (2004). En *Levantamientos de suelos y zonificación de tierras del departamento del Valle del Cauca Tomo I (Vol. 1)*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Corporación Autónoma Regional del Valle.
- Instituto Geográfico "Agustín Codazzi" (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. IGAC.
- Leggo, P.J., Ledésert, B. y Christie, G. (2006). The role of clinoptilolite in organo-zeolitic-soil systems used for phytoremediation. *Science of the total environment*, 363(1), 1-10. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969705006832>
- Marcano, L. y Elizalde, G. (2010). Nitrato lixiviado de columnas de suelo sin disturbar, pertenecientes a dos suelos de la Cuenca del Lago de Valencia. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 25(2), 67-72. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652010000200007
- Navarro García, G. y Navarro García, S. (2013). *Química agrícola: Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Obrigón-Portocarrero, N., Díaz-Ortiz, J.E., Daza-Torres, M.C. y Aristizabal-Rodríguez, H.F. (2016). Efecto de la aplicación de zeolita en la recuperación de nitrógeno y el rendimiento de maíz. *Acta Agronómica*, 65(1), 24-30. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28122016000100004
- Porta, J., López-Acevedo, M. y Poch, R. (2014). *Edafología: uso y protección de suelos*. Mundi-Prensa.
- Shaygan, M., Reading, L.P. y Baumgartl, T. (2017). Effect of physical amendments on salt leaching characteristics for reclamation. *Geoderma*, 292, 96-110. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706117300228>
- Shen, Y., Jiao, S., Ma, Z., Lin, H., Gao, W. y Chen, J. (2020). Humic acid-modified bentonite composite material enhances urea-nitrogen use efficiency. *Chemosphere*, 255, 126976. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653520311693>
- Team, R.C. (2015). *R. A language and environment for statistical computing (Version 3.2.2)*. Wien: R Foundation for Statistical Computing.
- Yao, Y., Gao, B., Fang, J., Zhang, M., Chen, H., Zhou, Y., Creamer, A.E., Sun, Y. y Yang, L. (2014). Characterization and environmental applications of clay-biochar composites. *Chemical Engineering Journal*, 242, 136-143. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894713016434>