

Evaluation of Nitrogen Mineralization in an Acid Soil with Inorganic and Organic Fertilization

Evaluación de la mineralización del nitrógeno en un suelo ácido bajo fertilización inorgánica y orgánica

Luz Karime Torres-Lozada* ¹, Duvan Escobar-Medina ², Jonathan Soto-Paz ², Martha Constanza Daza-Torres ³, Patricia Torres-Lozada ²

¹Fundación Universitaria Unisangil, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Grupo de Investigación Terranare, Yopal, Colombia., ²Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental ECCA, Cali, Colombia, ³Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Gestión Integral del Riego para el Desarrollo Agrícola y la Seguridad Alimentaria REGAR, Cali, Colombia. Correspondence email: luz.torres.lozada@correounivalle.edu.co, ltorres2@unisangil.edu.co

Recibido: 03/09/2020. Modificado: 11/05/2021. Aceptado: 20/05/2021.

Abstract

Context: The population increase and the demand for food generate greater demands on productivity, which stimulates the use of inorganic fertilizers as a common practice in agricultural systems, thus generating potential risks of contamination by nutrient leaching, in addition to high costs that can affect the profitability of production systems. The application of organic materials from the composting of organic substrates is a common source of fertilization in clean, organic production systems with lower costs.

Method: This study evaluated the effect of fertilization with an Organic Amendment (EO) from the composting of Municipal Biowaste-BW mixed with cachaça on the mineralization of nitrogen ($N_{\text{mineralized}}$) in an acidic soil through six treatments: three controls (T1: 100 % soil; T2: 100 % EO; T3: 100 % urea-inorganic fertilization: F) and three EO(%):F(%) proportions (T4: 50-50, T5: 75-25, T6: 25-75) during an incubation period of 16 weeks.

Results: Four mineralization models were applied (Stanford & Smith, Broadbent, linear, and polynomialExponential), and it was found that T4 allowed to achieve a contribution of $N_{\text{mineralized}}$ (12.546,39 mg/kg) similar to inorganic fertilization (T3: 13.931,05 mg/kg); the Broadbent ($R^2 > 0,98$) and linear ($R^2 > 0,90$) models achieved the best fit.

Conclusions: This partial inorganic fertilizer replacement strategy can achieve up to 50 % inorganic fertilizer replacement.

Keywords: Biowaste-BW, Cachaça, Composting, Nitrogen Mineralization, Urea

Acknowledgements: The authors wish to express their appreciation for the support of project C. I. 2985 of Universidad del Valle.

Language: Spanish

Open access



Cite this paper as: Torres-Lozada, L. K, Escobar-Medina, D., Soto-Paz, J., Daza-Torres, M. C., Torres-Lozada, P.: Evaluación de la mineralización del nitrógeno en un suelo ácido bajo fertilización inorgánica y orgánica. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 2, pp. 197-212 (2021).

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

<https://doi.org/10.14483/23448393.16954>

Resumen

Contexto: El incremento poblacional y la demanda de alimentos generan mayores demandas en la productividad, lo que estimula el uso de fertilizantes inorgánicos como una práctica habitual en los sistemas agrícolas, generando potenciales riesgos de contaminación por lixiviación de nutrientes, además de altos costos que pueden afectar la rentabilidad de los sistemas productivos. La aplicación de materiales orgánicos procedentes del compostaje de sustratos orgánicos es una fuente de fertilización común en sistemas de producción limpia, orgánica y con menores costos.

Método: En este estudio se evaluó el efecto de la fertilización con una enmienda orgánica (EO) procedente del compostaje de biorresiduos de origen municipal (BOM) mezclados con cachaza, sobre la mineralización del nitrógeno ($N_{\text{mineralizado}}$) de un suelo ácido, evaluando seis tratamientos (tres controles: T1: 100 % suelo; T2: 100 % EO; T3: 100 % urea-fertilización inorgánica: F) y 3 proporciones EO (%): F (%) (T4: 50-50, T5: 75-25, T6: 25-75) en un periodo de incubación de 16 semanas.

Resultados: Se aplicaron los modelos de mineralización de Stanford y Smith, Broadbent, Lineal y Polinomial-Exponencial, encontrándose que T4 permitió alcanzar un aporte de $N_{\text{mineralizado}}$ (12.546,39 mg/kg), el cual es un valor muy cercano al resultado obtenido por fertilización inorgánica (T3: 13.931,05 mg/kg); los modelos de Broadbent ($R^2 > 0,98$) y Lineal ($R^2 > 0,90$) alcanzaron los mejores ajustes.

Conclusiones: Esta estrategia de reemplazo parcial del fertilizante inorgánico puede lograr hasta un 50 % de reemplazo del fertilizante inorgánico.

Palabras clave: biorresiduos de origen municipal (BOM); cachaza; compostaje, mineralización de nitrógeno, urea

Agradecimientos: Agradecimientos: Los autores desean expresar su agradecimiento por el apoyo del proyecto C. I. 2985 de la Universidad del Valle.

Idioma: Español

1. Introducción

La intensificación de los sistemas agrícolas para satisfacer la creciente demanda de alimentos, ha generado una mayor demanda de fertilizantes, siendo la principal alternativa para suplir esta demanda la fertilización inorgánica, debido a la disposición inmediata de los nutrientes [1]. Sin embargo, esta creciente demanda de fertilizantes genera efectos negativos sobre el ambiente como la excesiva producción de residuos biodegradables y la degradación de los suelos [2], [3]. Autores indican que el uso excesivo de fertilizantes inorgánicos a largo plazo ha contribuido a reducir el contenido de materia orgánica y nutrientes del suelo, teniendo como consecuencia disminución de su calidad, acidificación y contaminación [4].

Una alternativa de fertilización con menores impactos ambientales [5], [6], es el uso de fertilizantes orgánicos como el compost proveniente de diferentes fuentes orgánicas [7]–[9] que puede mejorar algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo [10], [11] e incrementar la fertilidad del suelo de manera segura, con bajos costos [10], [12].

Entre los sustratos orgánicos de mayor aplicabilidad en el compostaje, se encuentra la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, conocidos como FORSU o BOM (biorresiduos de origen municipal) [13]. Esta estrategia de aprovechamiento de estos sustratos además permite mitigar los efectos negativos de su disposición final en rellenos sanitarios como la reducción del uso de áreas disponibles para disposición, que cada vez son más escasas [14] y la reducción en la ge-

neración de gases de efecto invernadero y lixiviados [15].

En el compostaje de BOM se recomienda su mezcla con otros sustratos para mejorar la calidad del producto final del compostaje [11], [16] encontrándose experiencias de compostaje de BOM con residuos agroindustriales como la cachaza (CA) [17], [18] resultante del procesamiento de la caña de azúcar [18], [19], cuyo producto final contribuye de manera importante con los requerimientos de N , que es el elemento más limitante y de mayor demanda en la agricultura, ya que es necesario para el crecimiento y desarrollo de las plantas del suelo [20]; sin embargo, metabólicamente no todo el N está disponible para la asimilación de las plantas y su aprovechamiento en los cultivos, debiendo pasar por un proceso de mineralización para ser asimilado por el suelo y así estar disponible para las plantas [21], [22]. Entre los modelos de mineralización evaluados se encuentran los mostrados en la Tabla I.

Tabla I. Ecuaciones modelos de mineralización		
Modelos no lineales		
a. Simple exponencial	$N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	[37]
Modelos lineales / linealizables		
b. Parabólico	$N_t = At^b$	[38]
c. Lineal	$N_t = \beta_0 + \beta_1 t$	-
d. Polinomial (2)	$N_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2$	-
e. Exponencial	$N_t = Ae^{kt}$	-

Autores como [23] y [24], han realizado estudios donde proponen el uso de mezclas de compost de diversas fuentes orgánicas y fertilizante inorgánico, estrategia que aporta al desarrollo de una producción agrícola sostenible y un medio ambiente saludable [9].

Por lo anterior, el objetivo principal de esta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación en un suelo ácido de diferentes proporciones de un fertilizante inorgánico (urea) y una enmienda procedente del co-compostaje de BOM:CA, sobre el proceso de mineralización del nitrógeno ($N_{\text{mineralizado}}$).

2. Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo en condiciones de invernadero con las siguientes características: Latitud $03^{\circ} 22' 22,7''$ Norte, Longitud $76^{\circ} 31' 47,9''$ Oeste, 995 msnm, temperatura media de 28°C , máxima de 32°C y mínima de 22°C y precipitación promedio anual de 900 mm [25]. El suelo utilizado fue un Andic Dystrudepts [26] del Valle del Cauca; la enmienda orgánica se obtuvo del producto final procedente del compostaje de BOM:CA en una proporción 80:20 [13]. En la Tabla II se presentan las propiedades del suelo y la enmienda orgánica empleadas, determinadas de acuerdo con [27], [28].

La unidad experimental (UE) para los ensayos de mineralización correspondió a bolsas de polietileno con dimensiones de 40 cm x 50 cm y capacidad de 2 kg. Cada UE se preparó con 1 kg de suelo, el cual fue tamizado a 2 mm, homogeneizado y cuarteado [29]. Para la conformación de

Tabla II. Propiedades del suelo y de la enmienda orgánica

Parámetro	Resultados análisis suelo	Resultados análisis enmienda orgánica (EO)	Unidades
Textura	Franco arcilloso	-	-
Densidad real (DR)	2,62 ± 0,53	-	Mg/m ³
Densidad aparente (DA)	0,98 ± 0,08	-	Mg/m ³
pH	5,1 ± 0,17	8,13 ± 0,47	-
CE	0,09 ± 0,01	0,38 ± 0,01	dS/m
CIC	81,75 ± 0,64	65,6 ± 3,10	cmol/kg
Carbono orgánico	13,47 ± 0,01	20,26 ± 0,10	%
Nitrógeno total (Nt)	0,27 ± 0,19	2,30 ± 0,2	%
Amonio (NH ₄ ⁺)	291,2 ± 0,03	-	mg/Kg
Nitrato (NO ₃ ⁻)	294,5 ± 0,14	-	mg/Kg

los tratamientos a evaluar, se utilizó un diseño unifactorial completamente al azar, evaluando como factor la influencia de la proporción de mezcla enmienda orgánica: fertilizante inorgánico-urea (EO: F) con tres niveles de estudio definidos, calculando las dosis en gramos a través de un balance de masa y partiendo de una dosis de 200 kg/ha de N para cada tratamiento [30]. Adicionalmente se contó con tres tratamientos control (testigos) como se muestra en la Tabla III, para un total de seis tratamientos, los cuales se evaluaron por triplicado.

Los tratamientos se incubaron ajustando la humedad a capacidad de campo (θ) en cada UE [31], este factor ayuda a representar la dinámica de mineralización de N del suelo y tiende a incrementarse cuando la humedad del suelo se aproxima a capacidad de campo y ayuda a no inhibir el proceso de nitrificación [32]. El resultado de la humedad a capacidad campo fue 50,09 %, porcentaje característico de suelos con presencia de arcillas [33] y se determinó a partir de la Ecuación (1), donde Vw corresponde al volumen de agua presente en la muestra (Vw) y volumen total de suelo (Vt).

$$\theta = \frac{Vw}{Vt} \cdot 100 \quad (1)$$

La humedad a capacidad de campo se monitoreó en cada UE, utilizando el medidor de humedad volumétrica de suelo TDR (Time Domain Reflectometry) [34]. El pH fue medido con un potenciómetro con el equipo pH meter Sartorius Portable - PT-10 y se tomó como una variable de respuesta, ya que es un indicador de la disponibilidad de N en el suelo. La forma aprovechable de N depende

Tabla III. Dosis de N por tratamiento por kg de suelo seco

Tratamiento	Configuración	Dosis Enmienda Orgánica (EO)** (g)	Dosis fertilizante inorgánico-urea (F) (g)
T1*	Testigo 1: Solo Suelo	-	-
T2*	Testigo 2: Suelo + EO	3,3	-
T3*	Testigo 3: Suelo + F	-	1,4
T4	Suelo + 50 % EO + 50 % F	1,7	0,72
T5	Suelo + 75 % EO + 25 % F	2,5	0,36
T6	Suelo + 25 % EO + 75 % F	0,8	1,08

* Testigos.

** Enmienda orgánica (EO): Producto final del compostaje de BOM: Cachaza - 80:20

del valor de pH, siendo el amonio utilizado con mayor facilidad en valores de $\text{pH} > 6$ unidades, mientras que el nitrato es absorbido con mayor facilidad en valores de $\text{pH} < 5$ [35].

El nitrógeno mineral o inorgánico se determinó en términos de amonio (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-), cuya sumatoria corresponde a la forma de N disponible para la planta [21], el cual se midió semanalmente durante las primeras 12 semanas de muestreo y luego cada 15 días, hasta la semana 16 [36]. Los datos fueron usados para construir las curvas de mineralización a partir del valor promedio de las tres réplicas de cada tratamiento.

Para determinar el efecto de la proporción de mezcla EO: F sobre la mineralización del nitrógeno, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) considerando un nivel de significancia del 5 % y para determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos, se aplicó la prueba Post ANOVA de Tukey [24].

2.1. Modelos de mineralización

A partir de los datos experimentales y las curvas de mineralización, se evaluaron los modelos mostrados en la Tabla I. El ajuste de los parámetros correspondientes a cada modelo se realizó implementando el algoritmo de Newton Raphsson en la plataforma de R (R-3.4.2). Para la selección del mejor ajuste de cada modelo, se consideraron métricas como el coeficiente de determinación ajustado (R^2) y el cuadrado medio de error (CME), considerando que el mejor ajuste es aquel que maximiza el R^2 y simultáneamente minimiza el CME [22].

2.2. Resultados y discusión

Las Figuras 1, 2 y 3 muestran el comportamiento de las diferentes formas de nitrógeno (NH_4^+ , NO_3^- y $N_{\text{mineralizado}}$) durante las 16 semanas en los tratamientos evaluados. Para el NH_4^+ (Figura 1), los tratamientos T1 y T2 que corresponden a suelo sin aplicación y suelo más EO respectivamente, durante todo el tiempo presentaron un comportamiento homogéneo sin picos significativos, mientras que todos los tratamientos con F (urea) presentaron mayor liberación de NH_4^+ en las primeras siete semanas, donde se registraron los picos más altos.

Esto pudo deberse a que la urea se hidrolizó con rapidez por efecto de la enzima “ureasa” [39]. De la semana 14 a la 16, todos los tratamientos presentaron una disminución en el aporte de NH_4^+ , debido a que se están mineralizando los materiales más resistentes y que necesitan más tiempo para la descomposición por parte de los microorganismos [7]. La prueba ANOVA para el NH_4^+ mostró que en las semanas 1, 3, 5, 6, 7, 8 y 12, se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (ver los valores de p y F en Tabla IV) y mediante la prueba Post ANOVA, se encontró que el tratamiento que aportó mayor NH_4^+ en las semanas 2 y 10 fue T6 (suelo + 25 % EO + 75 % urea) y en las semanas 4 y 16 fue T3 (100 % urea) seguido por T4 (suelo + 50 % EO + 50 % urea), con aportes de 324,6 y 224,2 mg/kg de NH_4^+ respectivamente. Los resultados encontrados sugieren que con la enmienda orgánica se puede disminuir la fertilización con urea hasta en un 50 % por el aporte de amonio [11].

Para el NO_3^- (Figura 2), esta forma de nitrógeno se encuentra fácilmente disponible principalmente entre las semanas 3, 6 y 12 [7]. El tratamiento que mayor NO_3^- aportó durante las 16 semanas fue T4 (suelo + 50 % EO + 50 % F), seguido por T3. El análisis de varianza mostró que las diferentes dosis de enmienda orgánica tuvieron un efecto significativo sobre el aporte de nitratos para las semanas 3, 4, 6, 10, 12, 14 y 16 respectivamente (ver los valores de p y F se presenta en Tabla IV). La prueba de Tukey permitió evidenciar que, aunque el tratamiento que aportó mayor NO_3^- en la última semana fue T3 (100 % urea), fue seguido de T6 (suelo + 25 % EO + 75 % urea), con aportes de 402,8 y 268,8 mg/ kg respectivamente, resultado que es similar al encontrado en otras investigaciones [24].

Tabla IV. Valores de p y F entre tratamientos en Amonio y Nitrato

Semana	Amonio		Nitrato	
	F	p	F	p
1	9,460	0,001	0,510	0,765
2	2,450	0,095	1,640	0,224
3	14,710	0,000	7,640	0,002
4	2,390	0,101	3,990	0,023
5	4,120	0,021	2,980	0,056
6	37,950	0,000	12,200	0,000
7	14,390	0,000	2,550	0,086
8	3,650	0,031	2,710	0,073
10	1,600	0,234	3,400	0,038
12	12,990	0,000	6,760	0,003
14	0,470	0,793	3,540	0,034
16	2,220	0,119	5,500	0,007

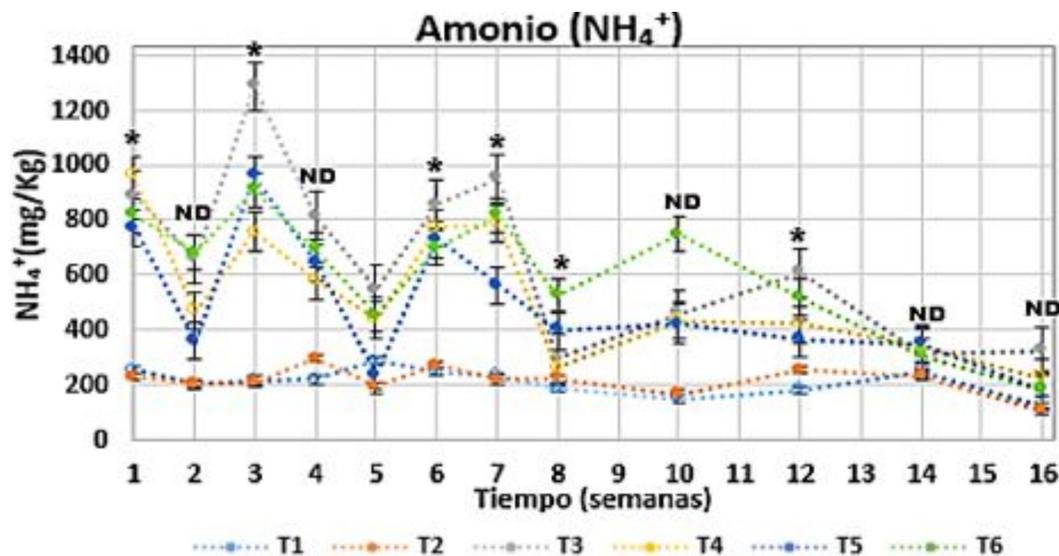


Figura 1. Comportamiento del NH_4 durante las 16 semanas ND: No presentó diferencia significativa; *presentó diferencia significativa

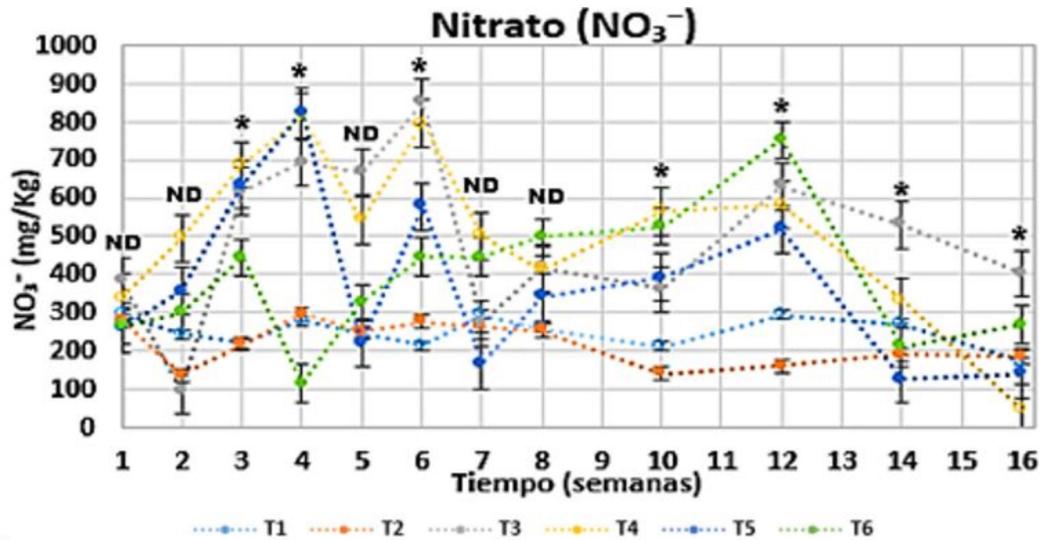


Figura 2. Comportamiento del NO_3^- durante las 16 semanas ND: No presentó diferencia significativa; *presentó diferencia significativa

Con relación al $N_{\text{mineralizado}}$ (Figura 3), en las primeras 8 semanas se observó una mayor mineralización del N en todos los tratamientos, evidenciado por los picos más altos de las curvas [11], [36]; de la semana 8 a la semana 12, la mineralización se comportó de forma más estable, mientras que a partir de la semana 12 se presentó un descenso, comportamiento que es similar a otros estudios con otro tipo de enmiendas orgánicas como el lombricompost y la gallinaza [36].

La Figura 4 muestra el comportamiento del pH, el cual se incrementó en todos los tratamientos conformados con urea durante las dos primeras semanas T3 (100 % urea), T4 (suelo + 50 % EO + 50 % urea), T5 (suelo + 75 % EO + 25 % urea) y T6 (suelo + 25 % EO+ 75 % urea), lo que se debe a que la concentración del N de este fertilizante (46 %) al ser aplicado al suelo, produce la

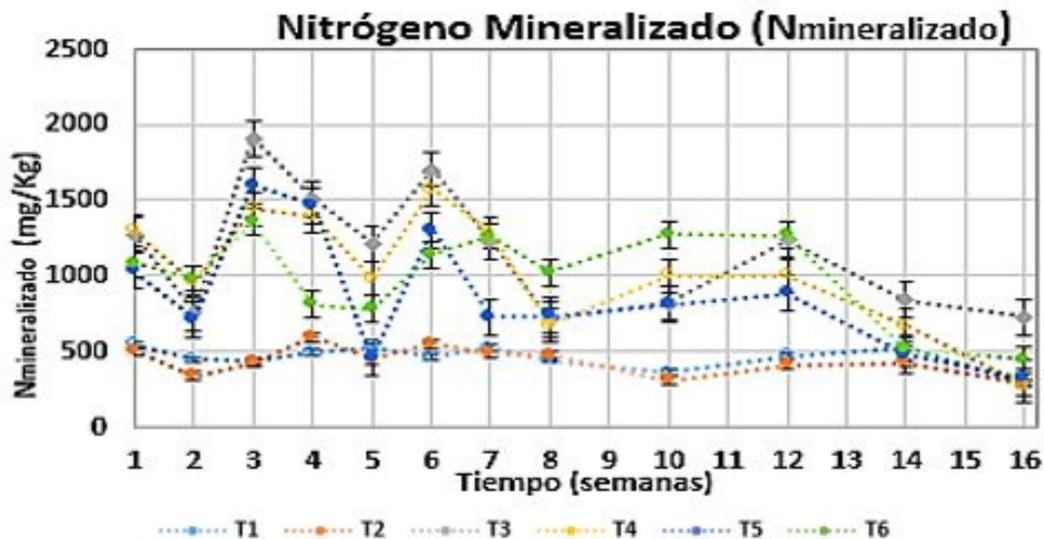


Figura 3. Comportamiento del $N_{\text{mineralizado}}$ durante las 16 semanas ND: No presentó diferencia significativa; *presentó diferencia significativa

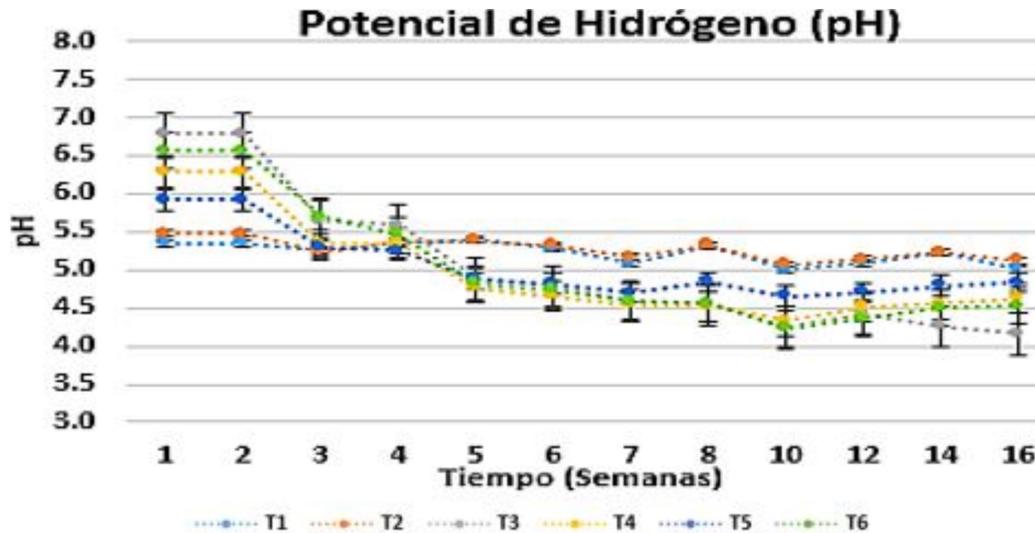


Figura 4. Comportamiento del pH durante las 16 semanas ND: No presentó diferencia significativa; *presentó diferencia significativa

hidratación del gránulo y su disolución y la ureasa bacteriana, enzima presente en los suelos, produce el desdoblamiento de la molécula en CO_3NH_4 (carbonato de amonio) y CO (monóxido de carbono) que es inestable, ocasionando hidrólisis de forma instantánea, generando un aumento del pH debido a la producción de amoníaco [40]; sin embargo, a partir de la semana 3 se evidenció una disminución del pH debido a la acción acidificante del fertilizante [41]–[43].

En contraste, los tratamientos sin urea (T1: Suelo sin aplicación y T2: 100 % EO), durante las 16 semanas, presentaron poca variabilidad en sus datos, teniendo un comportamiento más homogéneo. T2 no presentó diferencias significativas con respecto T1, que era el testigo absoluto, solo se mantuvo un 0,93 % por encima de los valores reportados por este tratamiento.

Con relación al $N_{\text{mineralizado}}$ acumulado durante las 16 semanas, en la Figura 5 se observa que en T3 (100 % urea) se alcanzó el mayor aporte de $N_{\text{mineralizado}}$ durante las 16 semanas y T4 (suelo + 50 % EO + 50 % urea) se comportó de manera similar, con una diferencia del aporte al final de la incubación de apenas el 9,94 %, lo que indica el potencial de la enmienda orgánica como reemplazo parcial de la fertilización química, pudiendo aportar tanto desde el punto de vista ambiental como económico [44]. Este resultado es similar al encontrado por otros autores [24], quienes afirmaron que los tratamientos con 100 % fertilizante mineral y 50 % fertilizante mineral y 50 % Compost (esquejes verdes, fracción orgánica de desechos municipales y otros materiales orgánicos), mostraron eficiencias similares en el uso de nitrógeno por parte de las plantas, debido a la disponibilidad relativamente inmediata de nitrógeno suministrado.

2.3. Modelos de mineralización

En la Figura 6 se observa el ajuste de los modelos matemáticos que describen el proceso de la mineralización del N para cada tratamiento y en las Tablas V a X se muestran los resultados de la modelación de la mineralización en cada tratamiento, con sus respectivos parámetros y errores.

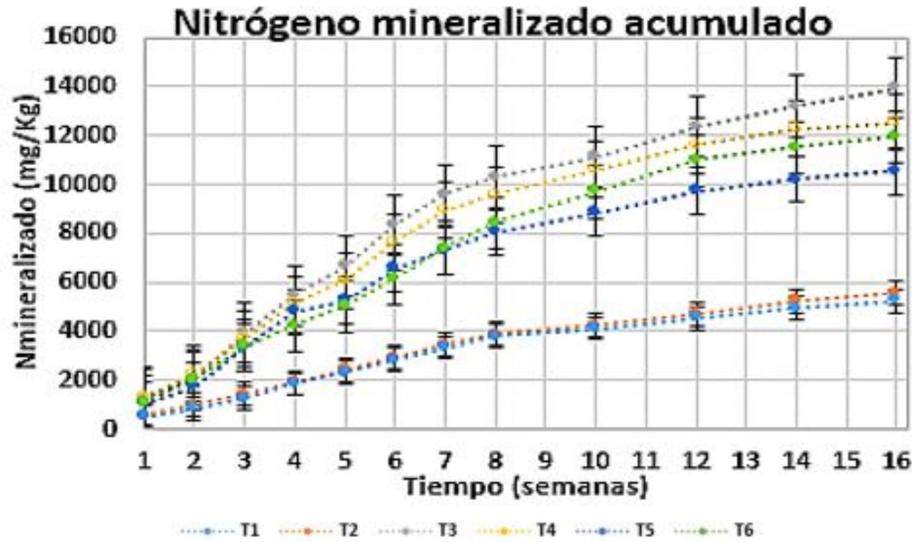


Figura 5. Nitrógeno mineralizado ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) acumulados durante las 16 semanas

De acuerdo con estos resultados, se observa que el modelo Exponencial Simple planteado por Stanford y Smith sobrestima significativamente el $N_{\text{mineralizado}}$ acumulado máximo observado en cada uno de los tratamientos, evidenciado también en los altos valores del cuadrado medio de error CME y el modelo polinomial de segundo grado fue el que presentó mejores valores de Coeficiente de determinación ($R^2 > 0,99$) en la dinámica de la mineralización del N; Sin embargo, en algunos de los tratamientos evaluados presentó parámetros no significativos ($p > 0,05$); en consecuencia, no es posible asegurar con una confianza del 95 %, que este modelo es el mejor predictor de la mineralización del N. Por lo anterior, los modelos Exponencial de Stanford y Smith y Polinomial de segundo grado se descartaron.

Los modelos de mejor ajuste en su orden fueron, parabólico de Broadbent ($R^2 > 0,80$), lineal ($R^2 > 0,80$) y Exponencial, siendo este último el que presentó el menor ajuste para los tratamientos conformados con EO y F (T1, T2 y T6), que arrojaron valores de coeficiente de determinación ($R^2 > 0,80$) y T3, T4 y T5 presentaron $R^2 < 0,80$. En el caso del modelo lineal, este presentó valores altos del cuadrado medio de error CME y mayor dispersión en los datos, mientras que el modelo parabólico (Broadbent), presentó buen ajuste como en otros casos de diferentes EO como Compost de rosas, gallinaza, conejaza, porquinaza lombricompost, entre otros evaluados [7], [22], [36]. Analizando el comportamiento de los modelos reportados en la literatura y los resultados del presente estudio, se ratifica la necesidad de evaluar en cada caso diferentes modelos, para analizar el que mejor represente la mineralización del nitrógeno, esto debido a que cada enmienda, dependiendo de donde proviene y del suelo aplicado su comportamiento, es diferente y estos modelos fueron realizados para ajustarse a características muy específicas.

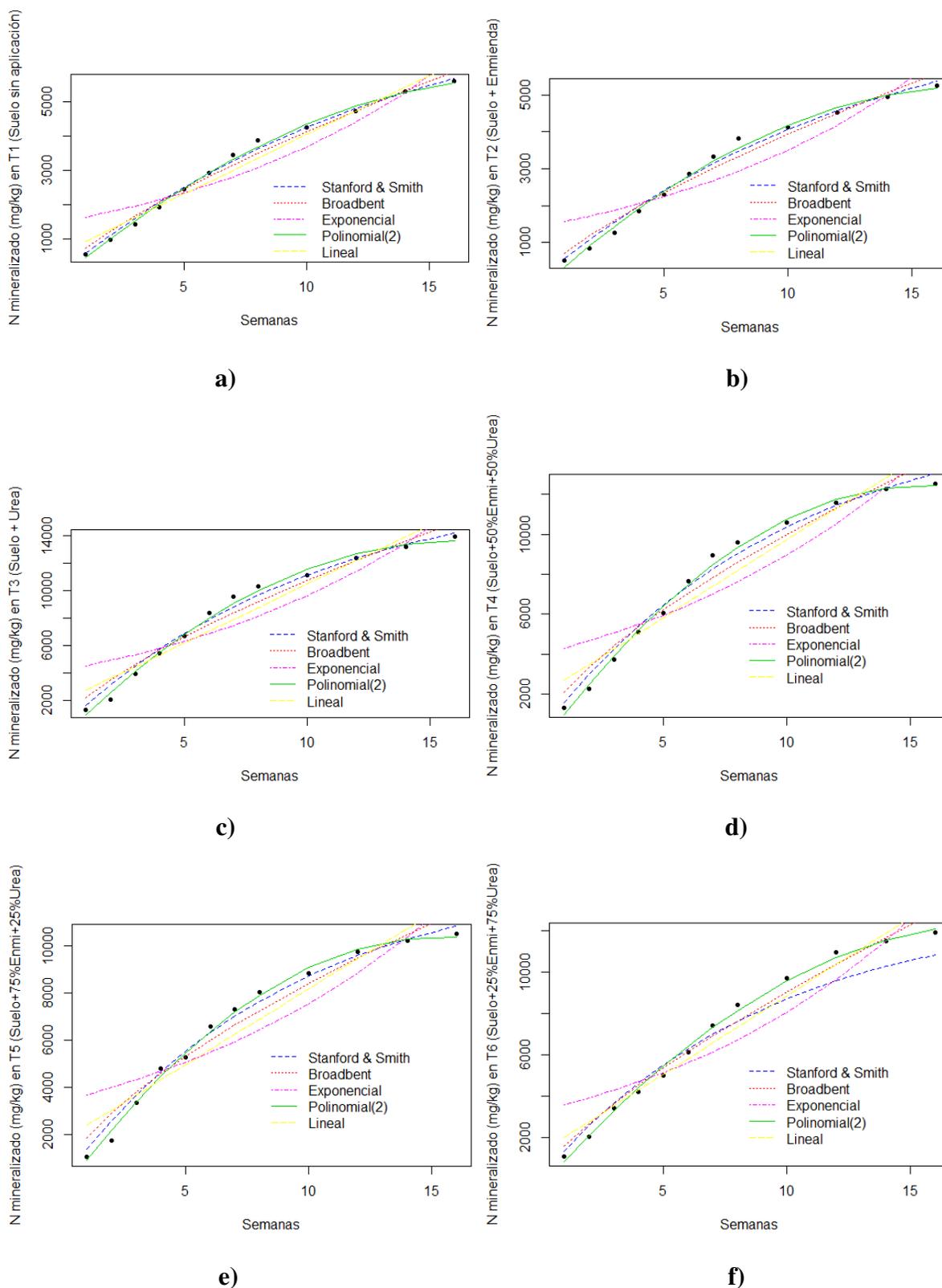


Figura 6. Modelos matemáticos de mineralización del Nitrógeno. a). T1; b). T2; c). T3; d). T4; e). T5; f). T6.

Tabla V. Parámetros y errores en los modelos para el T1 (Testigo 1 (Suelo sin aplicación))

Modelo	Parámetros	Estimación	p	R ² ajustado	CME
Exponencial simple (Stanford y Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	8287	4,20E-08	0,9942	17,939
	k	0,0719	1,87E-06		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	742,9	9,82E-07	0,9802	5,545
	B	0,7433	3,97E-09		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	1506	5,47E-05	0,8436	43,77
	k	0,0888	2,73E-05		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1t + \beta_2t^2$	B0	*-129,1	0,232	0,9955	1,152
	B1	598,7	6,68E-09		
	B2	-15,23	7,81E-06		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1t$	B0	612,5	0,00919	0,9557	12,4
	B1	340,6	1,87E-08		

*Parámetro no significativo (p > 0,05)

Tabla VI. Parámetros y errores en los modelos para el T2 (Testigo 2 (Suelo +EO))

Modelo	Parámetros	Estimación	p	R ² ajustado	CME
Exponencial simple (Stanford y Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	7601	7,33E-07	0,9881	34,224
	k	0,0763	3,30E-05		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	710,1	1,04E-05	0,9693	8,077
	B	0,7438	5,37E-08		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	1444	0,000113	0,8207	47,12
	k	0,0852	6,46e-05		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1t + \beta_2t^2$	B0	*-259,3	0,0637	0,9928	17,05
	B1	617,4	2,86e-08		
	B2	-17,3	1,37e-05		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1t$	B0	567,3	0,0236	0,9415	15,37
	B1	327,8	1,07e-07		

*Parámetro no significativo (p > 0,05)

Tabla VII. Parámetros y errores en los modelos para el T3 (Testigo 3 (Suelo + F))

Modelo	Parámetros	Estimación	p	R ² ajustado	CME
Exponencial simple (Stanford y Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	18.200	2,02E-07	0,9846	314,598
	K	0,0948	2,19E-05		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	2.157	2,76E-05	0,956	81,17
	B	0,698	3,07E-07		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	4.152	0,000152	0,786	397,6
	K	0,08384	0,000151		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1t + \beta_2t^2$	B0	-820	0,0477	0,9913	14,52
	B1	1.806	2,80E-08		
	B2	-56,52	5,43E-06		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1t$	B0	1.881	0,021	0,9137	160,3
	B1	859,9	7,57E-07		

*Parámetro no significativo (p > 0,05)

3. Conclusiones

Se observó que la aplicación del composts evaluado, es una adecuada fuente de fertilizante nitrogenado, con la que se puede lograr hasta un 50 % de reemplazo del fertilizante inorgánico (50 %

Tabla VIII. Parámetros y errores en los modelos para el T4 (Suelo + 50 % EO + 50 % F)

Modelo	Parámetros	Estimación	p	R ² ajustado	CME
Exponencial simple (Stanford y Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	16.290	5,03E-08	0,9862	232.979
	K	0,1011	7,85E-06		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	2.091	2,26E-05	0,9548	69,51
	B	0,679	3,29E-07		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	3.955	0,000133	0,7792	339,4
	K	0,08149	0,000173		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1t + \beta_2t^2$	B0	-670	0,0233	0,9951	68,37
	B1	1.686	1,86E-09		
	B2	-54,09	3,27E-07		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1t$	B0	1.914	0,014	0,908	140,4
	B1	780,2	1,01E-06		

*Parámetro no significativo (p > 0,05)

Tabla IX. Parámetros y errores en los modelos para el T5 (Suelo + 75 % EO + 25 % F)

Modelo	Parámetros	Estimación	p	R ² ajustado	CME
Exponencial simple (Stanford y Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	13.160	1,16E-08	0,9876	143.142
	K	0	2,74E-06		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	1838,000	1,81E-05	0,9541	48,34
	B	1	0,000000		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	3392,00000	0,000120	0,7735	48,34
	K	0	0,0002		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1t + \beta_2t^2$	B0	*-484,1	5,47E-02	0,9943	54,49
	B1	1421,00	3,10E-09		
	B2	-46	0,000		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1t$	B0	1733,0	1,06E-02	0,9016	103,7
	B1	643,8	1,47E-06		

*Parámetro no significativo (p > 0,05)

Tabla X. Parámetros y errores en los modelos para el T6 (Suelo + 25 % EO + 75 % F)

Modelo	Parámetros	Estimación	p	R ² ajustado	CME
Exponencial simple (Stanford y Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	18.370	5,65e-07	0,9906	144.965
	K	0,0708	2,05e-05		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	1.589	4,82e-06	0,9749	35,27
	B	0,756	1,96e-08		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	3.290	9,26e-05	0,8322	235,5
	K	0,0895	4,70e-05		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1t + \beta_2t^2$	B0	-520,1	0,0493	0,9953	59,43
	B1	1.381	5,85e-09		
	B2	-37	4,50e-06		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1t$	B0	1.248	0,0195	0,9512	68,44
	B1	761,2	4,29e-08		

*Parámetro no significativo (p > 0,05)

EO + 50 % F), condición con la que se alcanzó un aporte total de $N_{\text{mineralizado}}$ de 12.546,39 mg/kg al final de las 16 semanas, valor muy similar al obtenido con la aplicación de solo fertilizante inorgánico (13.931,05 mg/kg), que representa una diferencia de apenas el 9,94 %. Esta estrategia de reemplazo parcial del fertilizante inorgánico, además, puede aportar a la reducción de costos de

producción agrícola, así como a la mitigación de los efectos ambientales y sobre el suelo por el uso excesivo de fertilizantes químicos. Además, las características de la EO ayudaron a mantener estable el valor de pH del suelo, evitando niveles de acidificación mayor como los que se presentaron con los tratamientos que contenían urea.

Para este caso, el modelo parabólico de Broadbent y el lineal, que presentaron los mejores ajustes, con valores del coeficiente de determinación (R^2) mayores al 80 %; sin embargo, es recomendable en cada caso, evaluar diferentes modelos para identificar el que mejor represente este mecanismo.

Referencias

- [1] P. Heffer, and M. Prud'homme, "Outlook for world fertilizer demand, supply, and supply/demand balance", *Journal of Agriculture and Forestry*, vol. 32, no.3, pp. 159-164, 2008. ↑198
- [2] R. Lal, "Soils and sustainable agriculture. A review", *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 28, pp. 57-64, 2008. <https://doi.org/10.1051/agro:2007025> ↑198
- [3] M. J. Eckelman, W. Ashton, Y. Arakaki, K. Hanaki, S. Nagashima, and L. C. Malone-Lee, "Island waste management systems: Statistics, challenges, and opportunities for applied industrial ecology", *Journal of Industrial Ecology*, vol. 18, no. 2, pp. 306-317, 2014. <https://doi.org/10.1111/jiec.12113> ↑198
- [4] N. Chuan-chuan, G. Peng-dong, W. Bing-qing, L. Wei-peng, J. Ni-hao, and C. Kun-zheng, "Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content", *Journal of Integrative Agriculture*, vol. 16, no. 8, pp. 1819-1831, 2017. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61476-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61476-4) ↑198
- [5] A. D. Armenta-Bojórquez, C. García-Gutiérrez, J. R. Camacho-Báez, M. Á. Apodaca-Sánchez, L. Gerardo-Montoya y E. Nava-Pérez, "Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México", *Ra Ximhai*, vol. 6, no. 1, pp. 51-56, 2010. ↑198
- [6] D. Ramos Agüero y E. Terry Alfonso, "Generalidades de los abonos orgánicos: importancia del Bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas", *Cultivos Tropicales*, vol. 35, no. 4, pp. 52-59, 2014. ↑198
- [7] A. Figueroa-Barrera, J. G. Álvarez-Herrera, A. Forero, C. Salamanca y L. Pinzón, "Determinación del nitrógeno potencialmente mineralizable y la tasa de mineralización de nitrógeno en materiales orgánicos", *Temas Agrarios*, vol. 17, no. 1, pp. 32-43, 2012. <https://doi.org/10.21897/rta.v17i1.694> ↑198, 201, 202, 205
- [8] J. I. Mardomingo, R. P. Soler, M. Á. Casermeiro, M. T. de la Cruz y A. Polo., "Seasonal changes in microbial activity in a semiarid soil after application of a high dose of different organic amendments", *Geoderma*, vol. 206, pp. 40-48, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.025> ↑198
- [9] Z. Mukhtamar, D. Putri, and N. Setyowati, "Reduction of synthetic fertilizer for sustainable agriculture: Influence of organic and nitrogen fertilizer combination on growth and yield of green mustard", *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 361-364, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.18517/ijaseit.6.3.802> ↑198, 199
- [10] M.K. Abbasi, and A. Khizar, "Microbial biomass carbon and nitrogen transformations in a loam soil amended with organic-inorganic N sources and their effect on growth and N-uptake in maize", *Ecological Engineering*, vol. 39, pp.123-132, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.027> ↑198
- [11] A. Kelley, A. C. Wilkie, and G. Maltais-Landry, "Food-based composts provide more soil fertility benefits than cow manure-based composts in sandy soils", *Agriculture*, vol. 10, no. 69, pp. 1-12 2020. <https://doi.org/10.3390/agriculture10030069> ↑198, 199, 201, 203
- [12] J. E. Gilly, and B. Eghball, "Residual effects of compost and fertilizer applications on nutrients in runoff", *Biological Systems Engineering*, vol. 45, no. 6, pp. 1905-1910, 2002. ↑198
- [13] J. Soto-Paz, E. R. Oviedo-Ocaña, P. C. Manyoma, L. F. Marmolejo-Rebellón, P. Torres-Lozada, R. Barrera, A. Sanchez, and D. Komilis, "Influence of mixing ratio and turning frequency on the co-composting of biowaste with sugarcane filter cake: A mixture experimental design", *Waste and Biomass Valorization*, vol. 11, pp. 2475- 2489 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00592-2> ↑198, 199
- [14] K. Varón, J. P. Orjuela y P. C. Manyoma, "Modelo matemático para la ubicación de estaciones de transferencia de residuos sólidos urbanos", *Escuela de Ingeniería de Antioquia*, vol. 12, no. 23, pp. 61-70, 2015. ↑198

- [15] S. Mirmohamadsadeghi, K. Karimi, M. Tabatabaei, and M. Aghbashlo, "Biogas production from food wastes: A review on recent developments and future perspectives", *Bioresource Technology Reports*, vol. 7, pp. 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100202> ↑199
- [16] E. R. Oviedo-Ocaña, L. F. Marmolejo-Rebellón y P. Torres-Lozada, "Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. Lecciones desde Colombia", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 18, no. 1, pp. 31-42, 2017. <http://dx.doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2017.18n1.003> ↑199
- [17] R. Basanta, M. A. García Delgado, J. E. Cervantes Martínez, H. Mata Vázquez y G. Bustos Vázquez, "Sostenibilidad del reciclaje de residuos de la agroindustria azucarera: una revisión", *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, vol. 5, no. 4, pp. 293-305, 2009. <https://doi.org/10.1080/11358120709487704> ↑199
- [18] A. Bohórquez, Y. Puentes y J. C. Menjivar, "Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar", *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, vol. 15, no. 1, pp. 73- 81, 2014. https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num1_art:398 ↑199
- [19] S. Meunchang, S. Panichsakpatana, and R. W. Weaver, "Co-composting of filter cake and bagasse; by-products from a sugar mill", *Bioresource Technology*, vol. 96, no. 4, pp. 437-442, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.05.024> ↑199
- [20] L. M. Melgarejo (Editora), *Experimentos en fisiología vegetal*. Colombia, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2010. ↑199
- [21] H. Celaya-Michel y A. E. Castellanos-Villegas, "Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semi-áridas", *Terra Latinoamericana*, vol. 29, no. 3, pp. 343-356, 2011. ↑199, 201
- [22] J. A. Silva, P. Torres y J. Mosquera, "Evaluación de la mineralización de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 17, no. 4, pp. 434-442, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000400012> ↑199, 201, 205
- [23] E. Abreu Cruz, E. Araujo Camacho, S. L. Rodríguez Jiménez, A. L. Valdivia Ávila, L. Fuentes Alfonso and Y. Pérez Hernández, "Efecto de la aplicación combinada de fertilizante químico y humus de lombriz en *Capsicum annum*", *Centro Agrícola*, vol. 45, no. 1, pp. 52-61, 2018. ↑199
- [24] C. Maucieri, A. Barco, and M. Borin, "Compost as a substitute for mineral N fertilization? Effects on crops, soil and N leaching", *Agronomy*, vol. 9, no. 4, pp. 1-16, 2019. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040193> ↑199, 201, 202, 204
- [25] IDEAM. Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM, 2019. <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Cat-logo-Nacional-de-Estaciones-del-IDEAM/hp9r-jxuu/data> ↑199
- [26] IGAC - CVC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - Corporación Autónoma Regional del Valle). *Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del Departamento del Valle del Cauca*, Tomo I, p. 541, 2004. ↑199
- [27] ICONTEC. Norma Técnica Colombiana 5167. Productos para la industria agrícola, productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo, 2004. ↑199
- [28] IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi. *Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos*. Sexta edición. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá, 2006. ↑199
- [29] D. M. Solórzano, P. Brenes y W. Peña, "Mineralización de nitrógeno de rastrojo de vainica (*Phaseolus vulgaris*) en un suelo andisol tropical", *Cuadernos de Investigación UNED*, vol. 11, no. 3, pp. 388-394, 2019. <https://doi.org/10.22458/urj.v11i3.2700> ↑199
- [30] N. J. Montaña Mata, J. A. Simosa Mallé y A. J. Perdomo Gallardo, "Respuesta de tres cultivares de berenjena (*Solanum melogena L.*) a diferentes combinaciones de fertilizante orgánico y fertilizante químico", *UDO Agrícola*, vol. 9, no. 4, pp. 807-815, 2009. ↑200
- [31] FAO - Food and Agriculture Organization. Glosario de términos sobre humedad del suelo, 2005. <http://www.fao.org/docrep/008/y4690s/y4690s02.htm#bm02> ↑200
- [32] X. Videla, A. M. Parada, A. Nairo, I. Pino y R. Hood, "Efecto del contenido de agua en la mineralización bruta e inmovilización de nitrógeno", *Agricultura Técnica*, vol. 65, no. 1, pp. 74-78, 2005. ↑200
- [33] D. Hillel, *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier, 2003 <https://www.sciencedirect.com/book/9780123486554/introduction-to-environmental-soil-physics> ↑200
- [34] K. Largaespa y C. Henríquez, "Distribución espacial de la humedad y su relación con la textura en un suelo", *Agronomía Costarricense*, vol. 39, no. 3, pp. 137-147, 2015. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v39i3.21814> ↑200
- [35] M. Toledo, *Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de Honduras: Conceptos y métodos*, Honduras: IICA,

2016. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/3108/BVE17069071e.pdf;jsessionid=0A1640F17AB005C51C008A79E209585A> ↑201
- [36] B. M., Montoya Gómez, M. C. Daza y N. Urrutia Cobo, “Evaluación de la mineralización de nitrógeno en dos abonos orgánicos (lombricompost y gallinaza)”, *Suelos Ecuatoriales*, vol. 47, no. 1 y 2, pp. 47-52, 2017. ↑ 201, 203, 205
- [37] G. Stanford, and S. J. Smith, “Nitrogen mineralization potentials of soil”, *Soil Science Society of America Journal*, vol. 36, pp. 465-471, 1972. ↑199
- [38] F. E. Broadbent, “Empirical modeling of soil nitrogen mineralization”, *Soil Science*, vol. 141, pp. 208-213, 1986. ↑199
- [39] J. P. Flores Márgez, B. Corral Díaz, P. Osuna Ávila y A. I. Flores Arras, “Respuesta agronómica y edáfica a la aplicación de biosólidos en el cultivo algodónero en el Valle de Juárez, Chihuahua”, *Ciencia en la frontera*, vol. 14, pp. 75-88, 2016. ↑201
- [40] R. Melgar, Guía 2012: Fertilizantes, enmiendas y productos nutricionales. Argentina: Fertilizar Asociación Civil, 2012. ↑204
- [41] Cenicafe, “Causas de la acidez”, *La acidez del suelo, un limitante común para la producción del café*, Colombia: Centro Nacional de Investigaciones del Café Cenicafe, 2016. ↑204
- [42] G. A. Divito, H. R. Sainz Rozas, H. E. Echeverría, G. A. Studdert, and N. Wyngaard, “Long term nitrogen fertilization: Soil property changes in an Argentinean Pampas soil under no tillage”, *Soil & Tillage Research*, vol. 114, no. 2, pp. 117-126, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.04.005> ↑204
- [43] N. Wyngaard, H. E. Echeverría, H. R. Sainz Rozas, and G. A. Divito, “Fertilization and tillage effects on soil properties and maize yield in a Southern Pampas Argiudoll”, *Soil & Tillage Research*, vol. 119, pp. 22-30, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.12.002> ↑204
- [44] O. S. Hanserud, F. Cherubini, A. F. Øgaard, D. B. Müller, and H. Brattebø, “Choice of mineral fertilizer substitution principle strongly influences LCA environmental benefits of nutrient cycling in the agri-food system”, *Science of the Total Environment*, vol. 615, pp. 219-227, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.215> ↑204

Luz Karime Torres Lozada

Ingeniera agrícola, Universidad del Valle, 2019. Magister en logística y gestión de las cadenas de abastecimiento, 2021. Actualmente asistente de docencia estudiante de doctorado ingeniería con énfasis en ingeniería industrial en la Universidad del Valle. Experiencia como docente tiempo completo y dirección de programa de ingeniería agrícola fundación universitaria Unisangil. Líneas de investigación: uso de suelo, cadenas de suministro agrícolas, cultivos, aprovechamiento de residuos orgánicos. [CvLAC](#)
Correo electrónico: luz.torres.lozada@correounivalle.edu.co

Duvan Escobar Medina

Ingeniero agrícola, Universidad del Valle, 2019. Experiencia en investigación asociada aprovechamiento de residuos orgánicos. Líneas de investigación: agricultura orgánica, suelo, aprovechamiento de residuos orgánicos.
Correo electrónico: duvan.escobar@correounivalle.edu.co

Jonathan Soto Paz

Ingeniero sanitario y ambiental, Universidad del Valle, 2014. Doctor en ingeniería con énfasis en ingeniería sanitaria y ambiental, 2020 Líneas de investigación: aprovechamiento de residuos orgánicos, residuos sólidos y suelos.
Correo electrónico: jonathan.soto.paz@correounivalle.edu.co

Martha Constanza Daza Torres

Ingeniería agrícola, Universidad Nacional, 1997 Doctora en ingeniería con énfasis en ingeniería sanitaria y ambiental, 2019 Docente asociada Universidad del Valle Investigador Asociado Minciencias Líneas de investigación: abonos orgánicos, degradación de suelos, manejo y conservación de suelos, gestión integral del recurso hídrico, buenas prácticas agrícolas. [CvLAC](#)

Correo: martha.daza@correounivalle.edu.co

Patricia Torres Lozada

Ingeniería sanitaria, Universidad del Valle, 1988. Doctora ingeniería civil: hidráulica y saneamiento, Universidad de Sao Paulo, 2001. Profesora titular Universidad del Valle. Investigador Senior Minciencias, Líder del grupo de investigación ECCA - Estudio y Control de la Contaminación Ambiental Líneas de investigación: calidad y tratamiento de aguas, tratamiento de aguas residuales, residuos sólidos y suelos. [CvLAC](#)

Correo electrónico: patricia.torres@correounivalle.edu.co