



Artículo de Investigación (evaluado por pares)

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

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

Luz Karime Torres-Lozada

Duvan Escobar-Medina

Jonathan Soto-Paz

Martha Constanza Daza-Torres

Patricia Torres-Lozada

Como citar este artículo: Torres-Lozada, L. K., Escobar-Medina, D., Soto-Paz, J., Daza-Torres, M. C., Torres-Lozada, P. "Evaluation of Nitrogen Mineralization in an Acid Soil with Inorganic and Organic Fertilization", INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 2, 2021. doi: <https://doi.org/10.14483/23448393.16954>

Fecha de envío: 20-11-2019

Modificado: 23-04-2021

Fecha de aceptación: 30-05-2021

Editor: Nelson L. Díaz Aldana.

Este documento es la versión final de autor del manuscrito aprobado para publicación, incorporando todas las revisiones surgidas durante el proceso de evaluación por pares. Puede haber diferencias entre esta versión y la versión final diagramada para publicación impresa. Se recomienda consultar la versión publicada si usted desea citar este artículo.

La publicación final está disponible en: <https://doi.org/10.14483/23448393.16954>

This document is the author's final manuscript version of the journal article, incorporating any revisions agreed during the peer review. There may be differences between this and the publisher's version. You are advised to consult the publisher's version if you wish to cite from this article.

The final publication is available at: <https://doi.org/10.14483/23448393.16954>

Revista INGENIERÍA, Universidad Distrital Francisco José de Caldas

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/reving>

ISSN (print) 0121-750X - ISSN (web) 2344-8393

Contacto: revingenieria.ud@correo.udistrital.edu.co

Research

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-Medina², Jonathan Soto-Paz³, Martha Constanza Daza-Torres⁴, Patricia Torres-Lozada⁵**

^{1*}Fundación Universitaria Unisangil, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Grupo de Investigación Terranare, Yopal, Colombia.

^{2,3,5}Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental ECCA, Cali, Colombia.

⁴Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Gestión Integral del Riego para el Desarrollo Agrícola y la Seguridad Alimentaria REGAR, Cali, Colombia.

* Correspondence e-mail: luz.torres.lozada@correounivalle.edu.co, ltorres2@unisangil.edu.co

Received: 03/09/2020 - Modified: 14/04/2021 - Accepted: 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 polynomial-Exponential), 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

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

Open access



© The authors; licensee: Revista INGENIERÍA. ISSN 0121-750X, E-ISSN 2344-8393

Cite this paper as: Torres-Lozada, L. K, Escobar-Medina, D., Soto-Paz, J., Daza-Torres, M. C., Torres-Lozada, P.: *Evaluation of the mineralization of nitrogen in an acid soil un-der inorganic and organic fertilization*. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 2, 2021 pp:pp. doi: <https://doi.org/10.14483/23448393.16954>

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 generación 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 1.

Tabla 1. Ecuaciones modelos de mineralización

MODELO	ECUACIÓN	AUTOR
Modelos no lineales		
a. Simple exponencial	$N_t = N_o(1 - e^{-kt})$	Stanford & Smith (1972)
Modelos lineales / linealizables		
b. Parabólico	$N_t = At^b$	Broadbent (1986)
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	$N_t = Ae^{kt}$	-

Fuente: Silva et al., (2013)

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 compostaje de BOM:CA, sobre el proceso de mineralización del nitrógeno (Nmineralizado).

2. Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo en condiciones de invernadero con las siguientes características: Latitud 03° 22' 22,7" Norte, Longitud 76° 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 2 se presentan las propiedades del suelo y la enmienda orgánica empleados, determinados de acuerdo con [27], [28].

Tabla 2. 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

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 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 3, para un total de seis tratamientos, los cuales se evaluaron por triplicado.

Tabla 3. 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

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 V_w corresponde al volumen de agua presente en la muestra (V_w) y volumen total de suelo (V_t).

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} * 100 \quad (1)$$

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 del valor de pH, siendo el amonio utilizado con mayor facilidad en valores de pH > 6 unidades, mientras que el nitrato es absorbido con mayor facilidad en valores de 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].

• Modelos de mineralización

A partir de los datos experimentales y las curvas de mineralización, se evaluaron los modelos mostrados en la Tabla 1. 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].

3. Resultados y discusión

Las Figuras 1, 2 y 3 muestran el comportamiento de las diferentes formas de nitrógeno (NH_4^+ , NO_3^- y $\text{N}_{\text{Mineralizado}}$) 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.

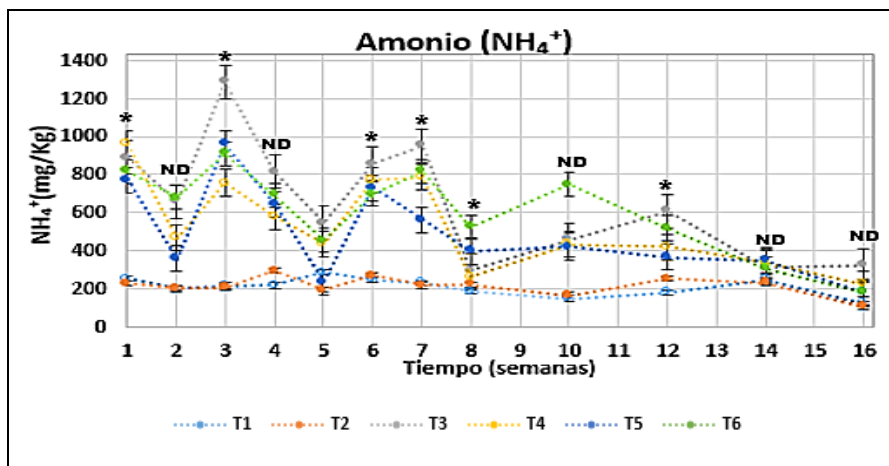


Figura 1. Comportamiento del NH_4 durante las 16 semanas
 ND: No presentó diferencia significativa; *presentó diferencia significativa

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 4) 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].

Tabla 4. 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

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 4). 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].

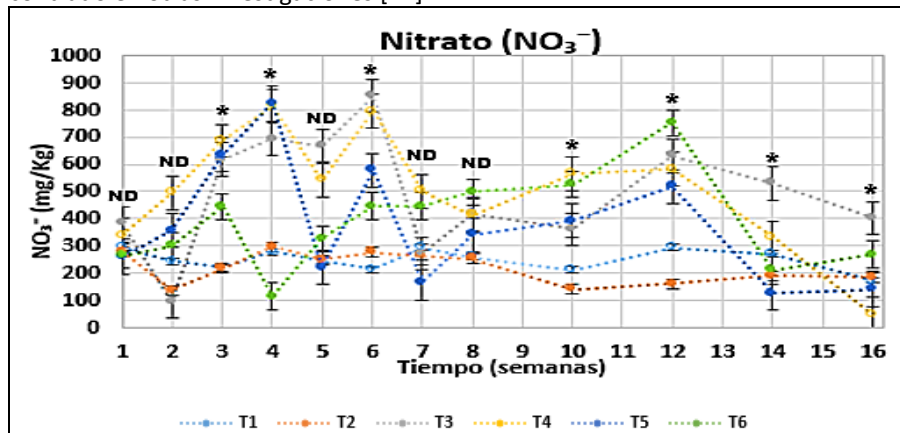


Figura 2. Comportamiento del NO_3^- durante las 16 semanas
 ND: No presentó diferencia significativa; *presentó diferencia significativa

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].

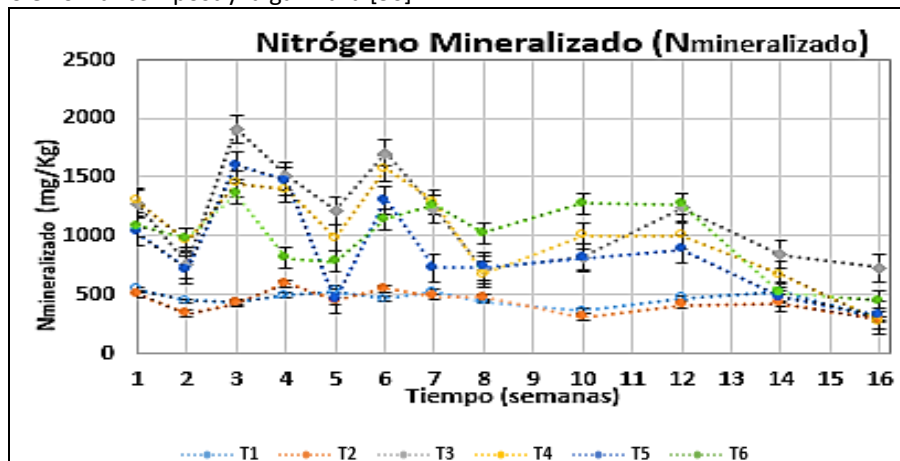


Figura 3. Comportamiento del $N_{\text{mineralizado}}$ durante las 16 semanas
 ND: No presentó diferencia significativa; *presentó diferencia significativa

La Figura 4 muestra el comportamiento del pH, el cual se incrementó en todos los tratamientos conformados con urea durante las 2 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 debe a que la concentración del N de este fertilizante (46%) al ser aplicado al suelo, produce la 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], [42], [43].

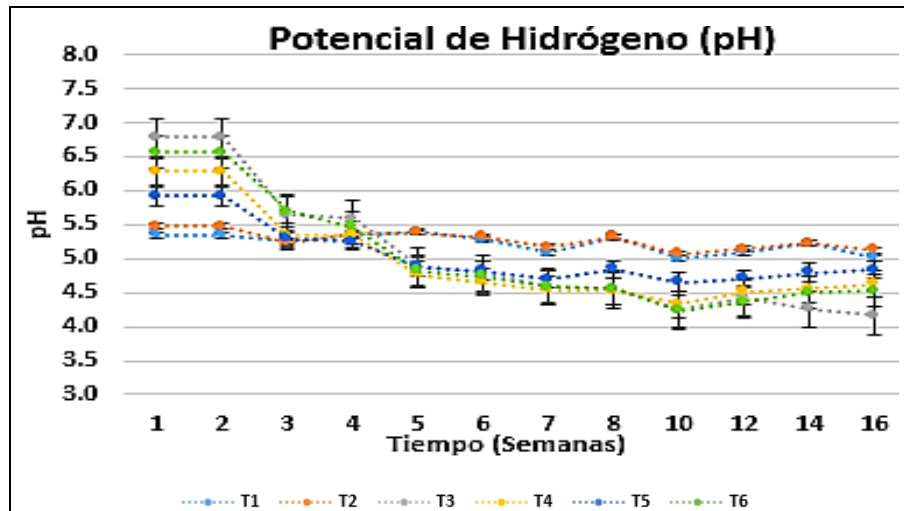


Figura 4. Comportamiento del pH durante las 16 semanas
 ND: No presentó diferencia significativa; *presentó diferencia significativa

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 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.

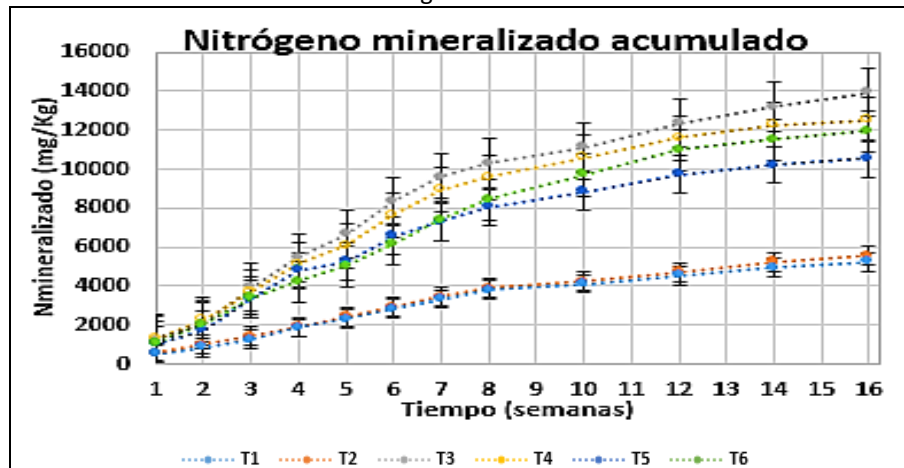


Figura 5. Nitrógeno mineralizado (NH_4^+ + NO_3^-) acumulados durante las 16 semanas

- **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 4 a 9, se muestran los resultados de la modelación de la mineralización en cada tratamiento, con sus respectivos parámetros y errores.

De acuerdo con estos resultados, se observa que el modelo Exponencial Simple planteado por Stanford & Smith, sobrestima significativamente el N 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 & Smith y Polinomial de segundo grado se descartaron.

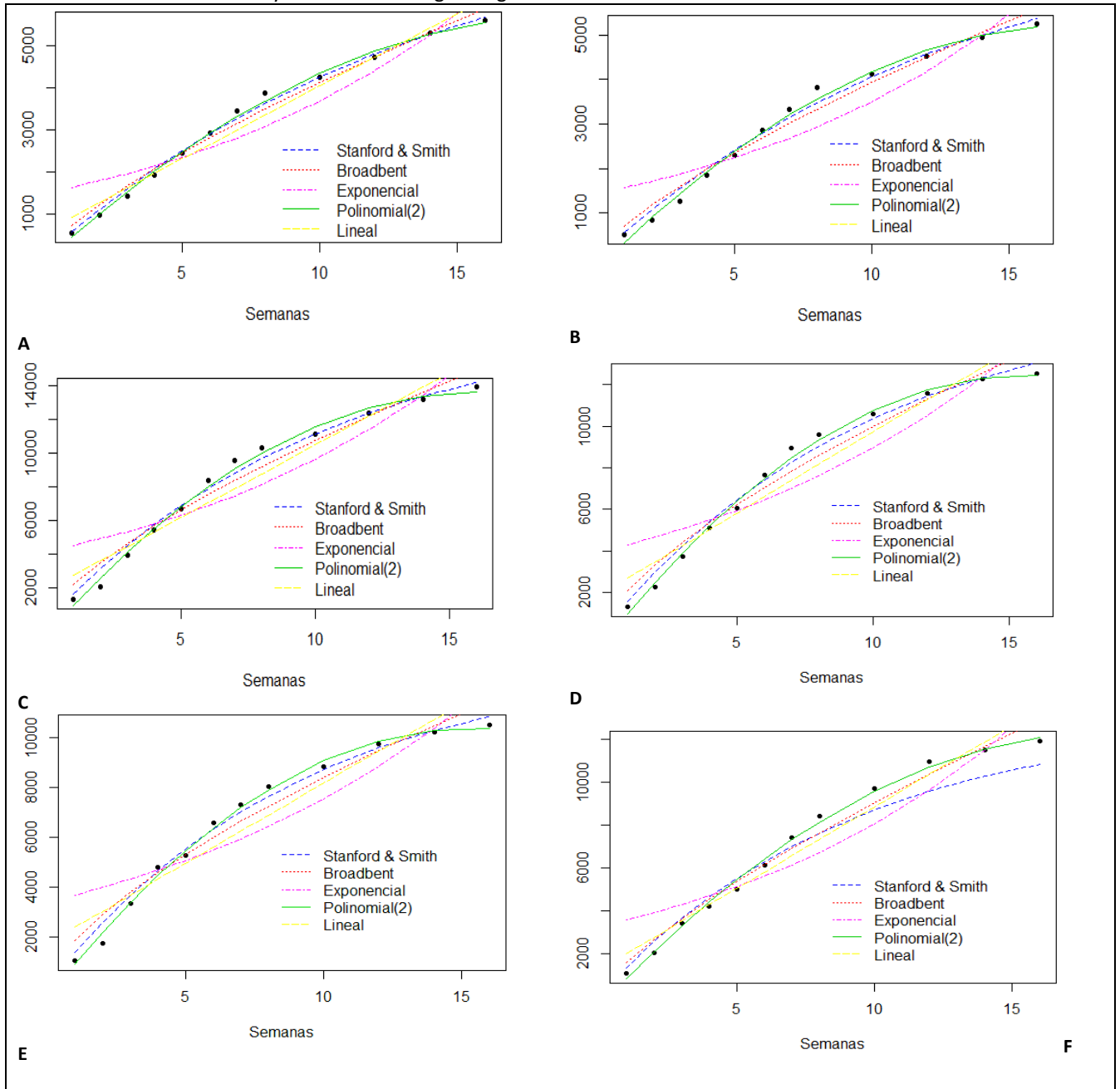


Figura 6. Modelos matemáticos de mineralización del Nitrógeno. **A** T1; **B**. T2; **C**. T3; **D**. T4; **E**. T5; **F**. T6.

Tabla 4. 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 & Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	8287	4.20e-08	0.9942	17939
	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) $N_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2$	B0	*-129.1	0.232	0.9955	1.152
	B1	598.7	6.68e-09		
	B2	-15.23	7.81e-06		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1 t$	B0	612.5	0.00919	0.9557	12.4
	B1	340.6	1.87e-08		

*Parámetro no significativo (p > 0.05)

Tabla 5. Parámetros y errores en los modelos para el T2 (Testigo 2 (Suelo +EO))

Modelo	Parámetros	Estimación	p	R ² Ajustado	CME
Exponencial simple (Stanford & Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	7601	7.33e-07	0.9881	34224
	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) $N_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2$	B0	*-259.3	0.0637	0.9928	17.05
	B1	617.4	2.86e-08		
	B2	-17.3	1.37e-05		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1 t$	B0	567.3	0.0236	0.9415	15.37
	B1	327.8	1.07e-07		

*Parámetro no significativo (p > 0.05)

Tabla 6. Parámetros y errores en los modelos para el T3 (Testigo 3 (Suelo + F))

Modelo	Parámetros	Estimación	p	R ² Ajustado	CME
Exponencial simple (Stanford & Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	18200	2.02e-07	0.9846	314598
	K	0.0948	2.19e-05		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	2157	2.76e-05	0.956	81.17
	B	0.698	3.07e-07		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	4152	0.000152	0.786	397.6
	K	0.08384	0.000151		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2$	B0	-820	0.0477	0.9913	14.52
	B1	1806	2.80e-08		
	B2	-56.52	5.43e-06		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1 t$	B0	1881	0.021	0.9137	160.3
	B1	859.9	7.57e-07		

*Parámetro no significativo (p > 0.05)

Tabla 7. 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 & Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	N0	16290	5.03e-08	0.9862	232979
	K	0.1011	7.85e-06		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	2091	2.26e-05	0.9548	69.51
	B	0.6792	3.29e-07		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	3955	0.000133	0.7792	339.4
	K	0.08149	0.000173		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2$	B0	-670.3	0.0233	0.9951	68.37
	B1	1686	1.86e-09		
	B2	-54.09	3.27e-07		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1 t$	B0	1914	0.0139	0.908	140.4
	B1	780.2	1.01e-06		

*Parámetro no significativo (p > 0.05)

Tabla 8. 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 & Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	NO	13160	1.16e-08	0.9876	143142
	K	0.1089	2.74e-06		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	1838	1.81e-05	0.9541	48.34
	B	0.6603	3.46e-07		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	3392	0.000120	0.7735	238.7
	K	0.0798	0.000192		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2$	B0	*-484.1	0.0547	0.9943	54.49
	B1	1421	3.10e-09		
	B2	-46.4	4.62e-07		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1 t$	B0	1733	0.0106	0.9016	103.7
	B1	643.8	1.47e-06		

*Parámetro no significativo (p > 0.05)

Tabla 9. 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 & Smith) $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$	NO	18370	5.65e-07	0.9906	144965
	K	0.0708	2.05e-05		
Parabólico (Broadbent) $N_t = At^b$	A	1589	4.82e-06	0.9749	35.27
	B	0.756	1.96e-08		
Exponencial $N_t = Ae^{kt}$	A	3290	9.26e-05	0.8322	235.5
	K	0.0895	4.70e-05		
Polinomial (Grado 2) $N_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2$	B0	-520.1	0.0493	0.9953	59.43
	B1	1381	5.85e-09		
	B2	-37	4.50e-06		
Lineal $N_t = \beta_0 + \beta_1 t$	B0	1248	0.0195	0.9512	68.44
	B1	761.2	4.29e-08		

*Parámetro no significativo (p > 0.05)

Los modelos de mejor ajuste en su orden fueron, parabólico de Broadbent (R2>0.80), lineal (R2 > 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 (R2 >0.80) y T3, T4 y T5 presentaron R2 <0.80. En el caso del modelo lineal, éste 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 re-portados 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 da-dado a que cada enmienda y dependiendo de donde proviene y del suelo aplicado su comportamiento es diferente y estos modelos fueron realizados para ajustarse a características muy específicas.

4. 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% EO + 50% F), condición con la que se alcanzó un aporte total de Nmineralizado de 12546.39 mg/ kg al final de las 16 semanas, valor muy similar al obtenido con la aplicación de solo fertilizante inorgánico (13931.05 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 las 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 (R2) mayores al 80%; sin embargo, es recomendable en

cada caso, evaluar diferentes modelos para identificar el que mejor represente este mecanismo.

5. Referencias

- [1] P. Heffer, M. and 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.
- [2] R. Lal, "Soils and sustainable agriculture. A review", *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 28, pp. 57–64, 2008. DOI: DOI: 10.1051/agro:2007025
- [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. DOI: 10.1111/jiec.12113
- [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. DOI: 10.1016/S2095-3119(16)61476-4
- [5] A. D. Armenta-Bojórquez, C. García-Gutiérrez, J. R. Camacho-Báez, M. Á. Apodaca-Sánchez, L. Gerardo-Montoya and E. Nava-Pérez, "Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México", *Ra Ximhai*, Vol. 6, no. 1, pp. 51-56, 2010.
- [6] D. Ramos Agüero and 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.
- [7] A. Figueroa-Barrera, J. G. Alvarez-Herrera, A. F. Forero, C. Salamanca and L. P. 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. DOI: 10.21897/rta.v17i1.694
- [8] J. I. Mardomingo, R. P. Soler, M. Á. Casermeiro, M. T. De la Cruz and 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. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.04.025
- [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*, Vol. 6, no. 3, pp. 361-364, 2016. DOI: 10.18517/ijaseit.6.3.802
- [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. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2011.12.027
- [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. DOI: 10.3390/agriculture10030069
- [12] J.E. Gilly and B. Eghball, "Residual effects of compost and fertilizer applications on nutrients in runoff", *Biological Systems Engineering*, Vol. 45, pp. 1905-1910, 2002.
- [13] J. Soto-Paz, E. R. Oviedo-Ocaña, P. C. Manyoma, L. F. Marmolejo-Rebellon, P. Torres-Lozada, R. Barrena, 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 biomass and valorization*, Vol. 11, pp. 2475–2489 (2020). DOI: 10.1007/s12649-019-00592-2
- [14] K. V. Valencia, J. P. O. Cabrera and P. C. M. Velásquez, "Modelo matemático para la ubicación de estaciones de transferencia de residuos sólidos urbanos", *Revista EIA*, Vol. 12, no. 23, pp. 61-70, 2015.
- [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. DOI: 10.1016/j.biteb.2019.100202
- [16] E. R. Oviedo-Ocana, L. F. Marmolejo-Rebellon, and 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. DOI: 10.22201/ifi.25940732e.2017.18n1.003
- [17] R. Basanta, M. A. García Delgado, J. E. Cervantes Martínez, H. Mata Vázquez, and 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. DOI: 10.1080/11358120709487704
- [18] A. Bohorquez, Y. Puentes and J. C. Menjivar, "Evaluación de la calidad del compost producido a partir de sub-productos agroindustriales de caña de azúcar", *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, Vol. 15, no. 1, pp. 73-81, 2014.
- [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.
- [20] J. Barrera, L. M. Melgarejo, M. Romero, S. Hernández, M. E. Solarte, D. Suárez, L. V. Pérez, A. Rojas, M. Cruz, L. Moreno, S. Crespo and W. Pérez, *Experimentos en fisiología vegetal*. Colombia, Ed: Universidad

Nacional de Colombia, 2010.

- [21] H. Celaya-Michel and A. E. Castellanos-Villegas, "Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas", *Terra Latinoamericana*, Vol. 29, no. 3, pp. 343-356, 2011.
- [22] J. A. Silva, P. Torres and 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. DOI: 10.1590/S1415-43662013000400012
- [23] E. Abreu Cruz, E. Araujo Camacho, S. L. Rodríguez Jimenez, 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 annuum*", *Centro Agrícola*, Vol. 45, no. 1, pp. 52-61, 2018.
- [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. DOI: 10.3390/agronomy9040193
- [25] IDEAM. Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM, 2019. [En línea]. Recuperado de: <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Cat-logo-Nacional-de-Estaciones-del-IDEAM/hp9r-jxuu/data>
- [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.
- [27] ICONTEC. Norma Técnica Colombiana 5167. Productos para la Industria Agrícola, Productos Orgánicos Usados como Abonos o Fertilizantes y Enmiendas de Suelo, 2004.
- [28] IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi. *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. Sexta edición. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá, 2006.
- [29] D. M. S. Quesada, P. B. Rojas and W. Peña, "Mineralización de nitrógeno de rastrojo de vainica (*Phaseolus vulgaris*) en un suelo andisol tropical", *UNED Research Journal*, Vol. 11, no. 3, pp. 388-394, 2019. DOI: 10.22458/urj.v11i3.2700
- [30] N. J. Montaña Mata, J. A. Simosa Mallé and A. J. Perdomo Gallardo, "Respuesta de tres cultivares de berenjena (*Solanum melongena* L.) a diferentes combinaciones de fertilizante orgánico y fertilizante químico", *UDO Agrícola*, Vol. 9, no. 4, pp. 807-815, 2009.
- [31] FAO - Food and Agriculture Organization. Glosario de términos sobre humedad del suelo, 2005. [En Línea]. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/008/y4690s/y4690s02.htm#bm02>
- [32] X. Videla, A.M. Parada, A. Nairo, I. Pino and 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.
- [33] D. Hillel, *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier, 2004. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/book/9780123486554/introduction-to-environmental-soil-physics>
- [34] K. Largaespada and 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: 10.15517/rac.v39i3.21814
- [35] M. Toledo, *Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de Honduras: Conceptos y métodos*, 2016. [Online]. Available: <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/3108/BVE17069071e.pdf;jsessionid=0A1640F17AB005C51C008A79E209585A?sequence=1>
- [36] B. M., Montoya Gomez, M. C. Daza and 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, 2016.
- [37] G. Stanford and S. J. Smith, "Nitrogen mineralization potentials of soil", *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 36, pp. 465-471, 1972.
- [38] F. E. Broadbent, "Empirical modeling of soil nitrogen mineralization", *Soil Science*, Vol. 141, pp. 208-213, 1986.
- [39] J.P. Flores Márgez, B. Corral Díaz, P. Osuna Ávila and 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: revista de ciencia y tecnología de la UACJ*, Vol. 14, pp. 75-88, 2016.
- [40] R. Melgar, Guía 2012: Fertilizantes, enmiendas y productos nutricionales. R. J. Melgar (ed.). Agroeditorial: Fertilizar Asociación Civil, 2012.
- [41] CENICAFÉ. *Causas de la acidez. En La acidez del suelo, un limitante común para la producción del café*, Colombia: Centro Nacional de Investigaciones del Café, Avances técnicos CENICAFÉ, 2016. [Online]. Available: <https://www.cenicafe.org/es/publications/AVT0466.pdf>

- [42] A.G. Divito, H.R. Sainz Rozas, H.E. Echeverría, G.A. Studdert and N. Wyngaard, "Long term nitrogen fertilization: Soil property changes in an Argentine an Pampas soil under no tillage", *Soil & Tillage Research*, Vol. 114, pp. 117-

126, 2011.

[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.

[44] O. S. Hanserud, F. Cherubini, A. F. Øgaard, D. B. Müllera 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.