

Acidez del suelo y su relación con la materia orgánica y la acumulación de nitratos en los suelos de Ixtenco, Tlaxcala

Gabriel Marquez Aguilar^{1*} , José Antonio Hernández López² , Miguel García Pérez², Diego Sánchez Cerón³, Itzel Vázquez Luna³, María Ynes González Jiménez³

¹Secretaría de Impulso Agropecuario, Ex-Rancho La Aguanaja S/N, 90600 Apetatitlán, Tlaxcala, México. ²Secretaría de Impulso Agropecuario, Ex-Rancho La Aguanaja S/N, 90600 Apetatitlán, Tlaxcala, México. ³Universidad para el Bienestar Benito Juárez García, sede Cuapiaxtla, Carr. Cuapiaxtla Km 2+400, Benito Juárez 8 esq. Universidad Col. Ignacio Allende CP 90566, Cuapiaxtla, Tlaxcala, México.

Email de autor para correspondencia: *gabrielmarquezaguilar@hotmail.com

Recibido: 17 abril 2025. **Aceptado:** 17 agosto 2025

RESUMEN

La aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados, como la urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), puede generar procesos de acidificación del suelo a través de la nitrificación de nitratos (NO_3^-). En este estudio, se analizó la relación entre la concentración de NO_3^- -N, el porcentaje de materia orgánica (MO) y el pH del suelo en dos rangos diferenciados: suelos ácidos (pH 4.0-6.0) y suelos ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos (pH 6.01-8.0). Los resultados evidencian que la acumulación de NO_3^- es mayor en suelos ácidos, debido a que se encontró que, en la mayoría de las muestras, en porcentajes bajos de MO y pH, la concentración de NO_3^- -N tiende a incrementarse, registrando una media de 100-300 ppm. Este fenómeno se asocia a una aplicación excesiva de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, lo cual se relaciona al desconocimiento sobre la cantidad de fertilizante que la persona productora agrícola debe aplicar en los cultivos de acuerdo con encuesta realizada a un pequeño grupo que representa el 9.7% del total de 494 muestras analizadas. Por otro lado, en condiciones más estables de pH y MO se encontró una menor concentración de NO_3^- -N con una media de 0-100 ppm, lo cual se asocia a una mayor eficiencia en el uso de fertilizantes, evitándose el fenómeno de acidificación en estos suelos con condiciones más estables de pH y MO.

Palabras clave: Acidificación del suelo; amonio; materia orgánica; nitratos; pH; urea.

ABSTRACT

The excessive application of nitrogen fertilizers, such as urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), can lead to soil acidification processes through the nitrification of nitrates (NO_3^-). This study analyzed the relationship between NO_3^- -N concentration, the percentage of soil organic matter (OM), and soil pH across two distinct ranges: acidic soils (pH 4.0–6.0) and slightly acidic to slightly alkaline soils (pH 6.01–8.0). The results show that NO_3^- -N accumulation is greater in acidic soils, as most samples with low OM and pH levels showed an increase in NO_3^- -N concentrations, averaging 100–300 ppm. This phenomenon is associated with the overapplication of $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ and reflects a lack of knowledge among farmers regarding the appropriate fertilizer dosage for their crops, as suggested by a survey conducted on a small group representing 9.7% of the total 494 analyzed samples. In contrast, more stable pH and OM conditions were associated with lower NO_3^- -N concentrations, averaging 0–100 ppm, indicating greater fertilizer use efficiency and the absence of acidification processes in these more stable soils.

Keywords: Acidic soils; ammonium; nitrates; organic matter; pH; urea.

INTRODUCCIÓN

La acidez, la salinidad y la sodicidad del suelo son los indicadores más importantes de la degradación química del suelo, estos indicadores se refieren a cambios indeseables en las características químicas del suelo, provocados principalmente por intervención humana [1]. Particularmente, la acidificación del suelo es un proceso natural y progresivo en el desarrollo del suelo que provoca su erosión, este fenómeno es una de las principales limitaciones para la productividad y la sostenibilidad global de la agricultura, debido a que afecta casi el 40% de las tierras agrícolas del mundo, al disminuir la disponibilidad de los nutrientes en el suelo, tales como calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), fósforo (P) y molibdeno (Mo) y aumentar la toxicidad de aluminio (Al) y manganeso (Mn), estas

alteraciones conducen a una reducción de la producción agrícola, pérdida de biodiversidad en flora y fauna y reducción de los procesos subterráneos en el suelo [2-5]. Generalmente, el suelo se acidifica muy lento bajo condiciones naturales a lo largo de cientos de millones de años [6]. Sin embargo, algunos de los factores que han acidificado el suelo en las últimas décadas por diversas actividades humanas, se encuentran, la deposición ácida, la aplicación excesiva de nitrógeno (N) a base de amonio (NH_4^+), y la absorción de cationes por los cultivos, estos factores han acelerado drásticamente la acidez del suelo [2, 4, 5, 7].

El fertilizante nitrogenado más ampliamente utilizado a nivel global es la $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, cuya composición se basa completamente en la forma amídica del N. La descomposición de la $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ genera carbonato de amonio

$((\text{NH}_4)_2\text{CO}_3)$, el cual es un compuesto inestable que se transforma rápidamente en NH_4^+ , bicarbonato (HCO_3^-), e hidroxilo (OH^-) [8]. Después de la descomposición de la $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, el NH_4^+ generado se transforma en NO_3^- , a este proceso se le conoce como nitrificación, y es en esta etapa donde ocurre el mayor potencial de acidificación en el suelo, ya que cada NH_4^+ que se transforma en NO_3^- libera dos átomos de hidrógeno (H^+) [8]. Sin embargo, si el N proveniente de la $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ es absorbido en forma de NH_4^+ antes de la nitrificación, o si, tras la nitrificación de NH_4^+ es tomado por las plantas en forma de NO_3^- , el balance de acidificación será neutro. Esto se debe porque la acidificación del suelo únicamente ocurre cuando el N de la $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ aplicada no es tomado por las plantas [8].

El NO_3^- no absorbido por las plantas, además de ser un factor que contribuye a la acidificación del suelo, también es un riesgo de contaminación potencial para las aguas subterráneas y superficiales debido a las cargas negativas de la fracción sólida del suelo que provocan la lixiviación de NO_3^- a estos cuerpos de agua, provocando eutrofización en estos [9].

En este artículo se estudia la relación de la concentración de NO_3^- -N y su relación con la materia orgánica (MO) y el pH del suelo en los suelos de Ixtenco, Tlaxcala, México, con el fin de determinar los factores causantes de la acidez del suelo en este municipio y concientizar la aplicación moderada de urea en el estado de Tlaxcala.

METODOLOGÍA

Sitio de estudio

Los sitios de muestreo se realizaron en el municipio de Ixtenco, Tlaxcala (Latitud $19^\circ 15'$ N, Longitud $97^\circ 53'$ O), ubicado en el Altiplano central mexicano a 2500 metros sobre el nivel del mar. Ixtenco se sitúa en el extremo occidental del estado de Tlaxcala (figura 1), el municipio de Ixtenco limita al norte con Huamantla, al oriente con el estado de Puebla, al sur con Trinidad Sánchez Santos y al poniente con Huamantla e igualmente con Trinidad Sánchez Santos. El estudio comprende un total de 494 muestras, cada muestra de una parcela diferente, estas se muestrearon y recolectaron durante 2023, el área de superficie fue un total de 1024.34 hectáreas (ha) agrícolas, de las cuales, 3527 ha corresponden a superficies de labor, tierras dedicadas a cultivos anuales, de ciclo corto, frutales y plantaciones [10]. Los análisis de MO, macronutrientes, pH y caracterización textural se llevaron a cabo en el Laboratorio de Suelo y Agua, el cual forma parte de la Secretaría de Impulso Agropecuario del Gobierno del Estado de Tlaxcala, ubicado en el municipio de Ixtacuixtla de Mariano Matamoros. Sus instalaciones se encuentran en el Centro Nacional de Innovación en Agricultura del Altiplano y Especies Menores.

Muestra de suelo

Los suelos estudiados fueron principalmente: areno franco y franco arenoso, de acuerdo con la caracterización textural llevada a cabo que se observa en figura 2. El procedimiento de

recolección de muestras se realizó conforme a la NOM-021-RECNAT-2000 [11]. Para cada muestra se realizó un muestreo a una profundidad de 0-30 cm a través del método de

zigzag, se tomaron de 10-25 muestras simples en cada punto del zigzag por cada superficie analizada para obtener una muestra compuesta representativa de la superficie de interés.



Figura 1. Mapa de Ixtenco, Tlaxcala, México.

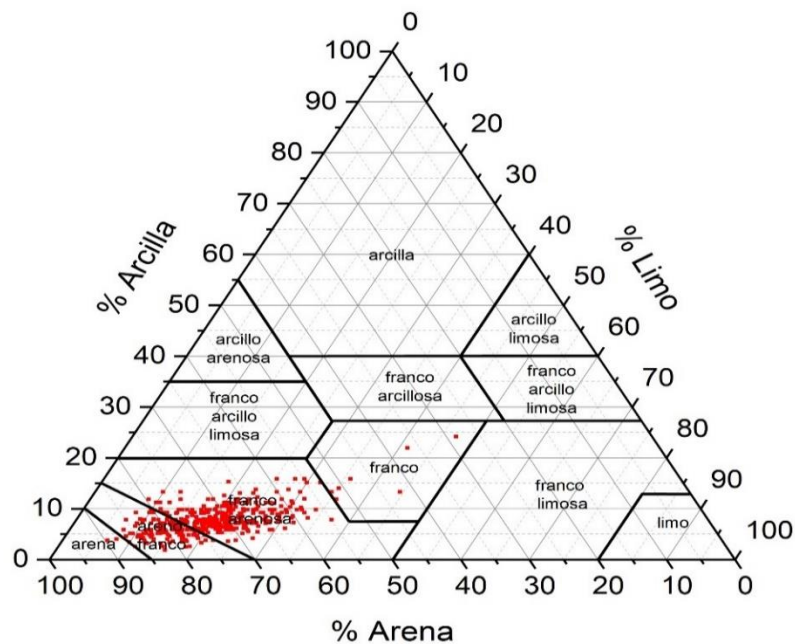


Figura 2. Triángulo de textura de Ixtenco, Tlaxcala, México.

Posteriormente, se secaron a temperatura ambiente durante 1 semana, se eliminaron piedras y restos de cosecha y se tamizaron a 2 mm y 500 μm para la medición de NO_3^- -N y pH y determinación de MO, respectivamente.

Análisis químico del suelo

La concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , K^+ , P^{5+} , NH_3 -N y NO_3^- -N se midió con un fotómetro multiparámetro (Hanna Instruments, HI 83225) y kits (Hanna Instruments) para cada nutriente, donde se utilizó la solución nutritiva obtenida del extracto de pasta saturada. La preparación de las muestras se realizó de acuerdo con las instrucciones del Manual de Operaciones Hanna HI83225 [12]. Este equipo se basa en el principio de la colorimetría, sobre que componentes específicos reaccionan con otros para formar un color con determinada intensidad [13].

Determinación de materia orgánica

La MO del suelo se determinó usando el método de Walkey-Black de acuerdo con la norma NOM-021-RECNAT-2000 [11]. Este método se basa en la oxidación húmeda del carbono orgánico del suelo agrícola mediante una mezcla de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 1N y ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4 al 97%), se agitó durante un minuto y se dejó reposar 30 minutos [11, 14]. Luego, se añadieron 200 ml de agua desionizada y 1 ml de difenilamina y se añadió ácido fosfórico (H_3PO_4 al 85%) para eliminar las estructuras

orgánicas remanentes que no se eliminan durante la reacción exotérmica generada en la reacción entre H_2SO_4 y $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ [15]. Por último, la mezcla se tituló con la adición de sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), hasta alcanzar un punto final de color verde, y se anotó su consumo.

Análisis de pH

La determinación del pH del suelo se realizó utilizando el sobrenadante de una mezcla suelo-agua en una relación 1:2, respectivamente. La preparación de las muestras se llevó a cabo conforme a lo establecido en la NOM-021-RECNAT-2000. Para la medición del pH, se utilizó un potenciómetro Hanna HI98131, el cual cuenta con calibración automática y un rango de medición de pH de 0 a 14, con una precisión de ± 0.01 unidades.

Análisis de la relación de pH, MO y NO_3^- -N

Para analizar la relación entre el pH, la MO y la concentración de NO_3^- -N en el suelo, se generó un gráfico tridimensional con el software OriginLab, en el que se representan los datos obtenidos. En el gráfico 1, el porcentaje de MO se ubicó en el eje X, la concentración de NO_3^- -N en el eje Y y el pH en el eje Z. Además, se construyeron histogramas de frecuencia para evaluar la distribución del contenido de MO y la concentración de NO_3^- -N en dos rangos de pH: 4.0-6.0 y 6.0-8.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de las 494 muestras de suelo recolectadas en el municipio de Ixtenco, Tlaxcala, permitió identificar patrones importantes en la relación entre el pH, la MO y la concentración de NO_3^- -N. Los suelos predominantes en la zona de estudio, clasificados como areno francos y franco arenosos, de acuerdo con figura 1 presentan características físicas que influyen directamente en propiedades como la MO [15].

El enfoque metodológico, basado en la recolección sistemática de muestras a una profundidad de 0-30 cm, el análisis químico mediante fotometría, y la determinación de MO, permitieron obtener una caracterización detallada de la fertilidad química del suelo, de sus características físicas, y su relación del pH con la MO y concentración de NO_3^- -N.

Asimismo, en Febrero de 2025 se realizó una encuesta a 48 personas (anexo 1), que representan el 9.7% de un total de las 494 muestras analizadas. Esta encuesta recabó información sobre el nivel educativo de los participantes, los tipos de fertilizantes que utilizan, si habían realizado análisis de suelo previamente, y su distribución por grupos de edad.

El gráfico de pastel mostrado en la figura 3a) ilustra la distribución del nivel educativo de las personas encuestadas. La mayor proporción de los encuestados cuenta con nivel de estudios de primaria (43.8 %), seguido por aquellos con nivel de secundaria (27.1 %) y preparatoria (12.5%). Por último, se encuentran los

participantes sin estudios, con carrera técnica y con posgrado, cada uno con representación de 2.1%. La figura 3b) muestra el gráfico de pastel donde se observan los fertilizantes usados por los encuestados. Se observó que la $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ es el fertilizante predominante, empleada por el 45.8% de los participantes. En segundo lugar, se encuentra el uso de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ y fosfato diamónico (DAP) con un 25%. Otros fertilizantes utilizados incluyen $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, DAP y cloruro de potasio (18.8%), $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ y cloruro de potasio (6.3%), $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ y composta con un 2.1%. Y un 2.1% de los encuestados indicó el uso de composta de forma individual. El gráfico de barras de la figura 3c) ilustra que el 100% de los encuestados no había realizado análisis de suelo previamente. Esto demuestra que hay desconocimiento sobre la utilidad del análisis de suelo como herramienta para la toma de decisiones agronómicas, así como un desconocimiento generalizado respecto a la dosificación óptima de fertilizantes de acuerdo con las características físicas, químicas y biológicas del suelo.

Por otra parte, el gráfico de barras que se ilustra en la figura 3d), presenta la distribución de los encuestados por grupos de edad en relación de los fertilizantes que utilizan. Se observó que la mayoría de los participantes se concentra en los grupos de 50-59, 60-69 y 70-91 años de edad siendo también la $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ el fertilizante predominante. El grupo de 70-91 años de edad muestra una mayor frecuencia de uso de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$. El grupo de 30-49 años de edad, presentan una distribución más equitativa entre los diferentes tipos de fertilizante. En general,

la $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ se mantiene como el fertilizante más utilizado en todos los grupos de edad. El número de personas en relación de los grupos de edad, concluye que es mayor la frecuencia de personas mayores de edad que se dedican a actividades agrícolas que personas con menos edad.

En la figura 4 se muestra la relación entre el porcentaje de MO (eje X), el pH (eje Z) y la

concentración de NO_3^- -N (eje Y) en el suelo. La distribución espacial de los puntos en figura 4 indica que la mayor acumulación de NO_3^- -N coincide con valores bajos de pH y MO, lo que refuerza la idea de que la aplicación intensiva de fertilizantes nitrogenados en suelos con bajo contenido de MO acelera los procesos de acidificación.

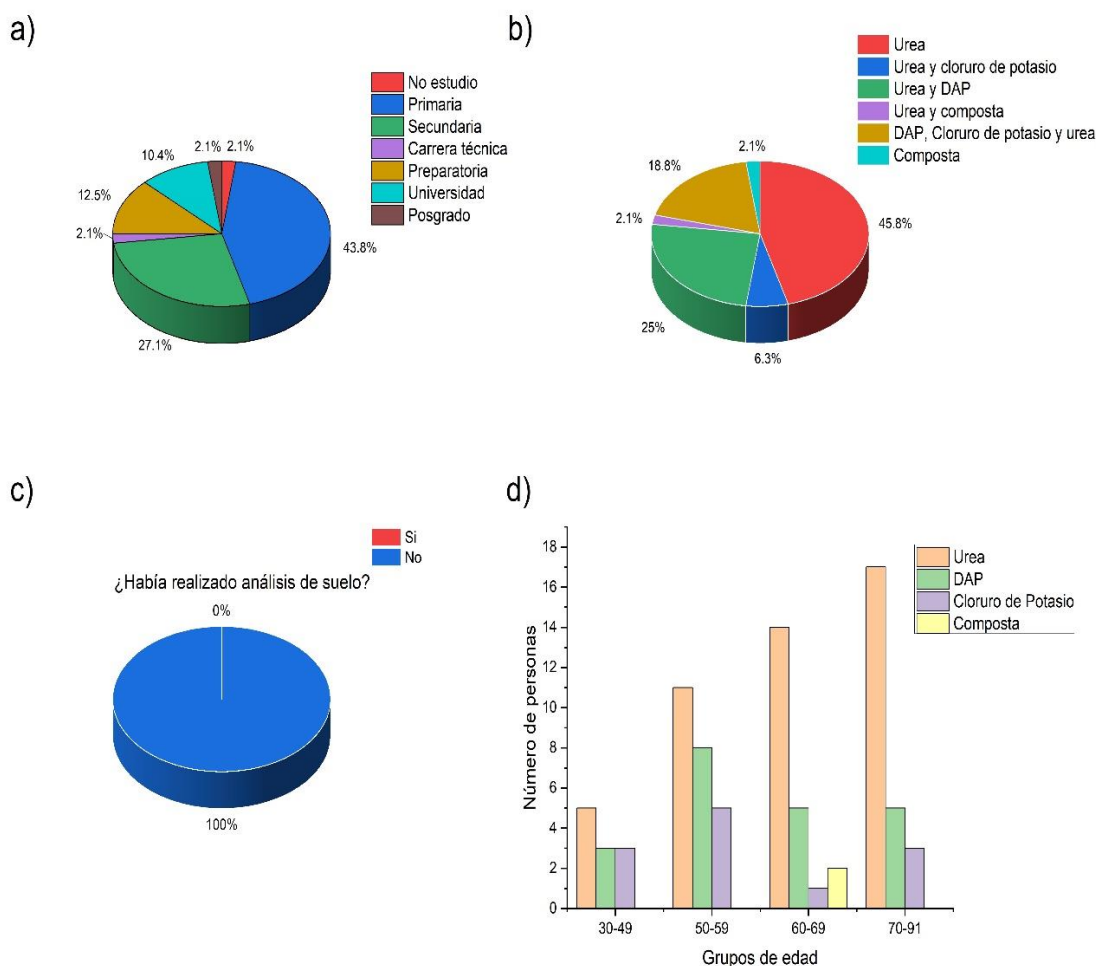


Figura 3. Encuesta realizada a grupo de 48 personas del municipio de Ixtenco; a) Porcentajes de nivel de estudio, b) Porcentajes de fertilizantes más utilizados, c) Porcentajes de personas que habían realizado análisis de suelo, d) Tipos de fertilizantes más usados por grupos de edad.

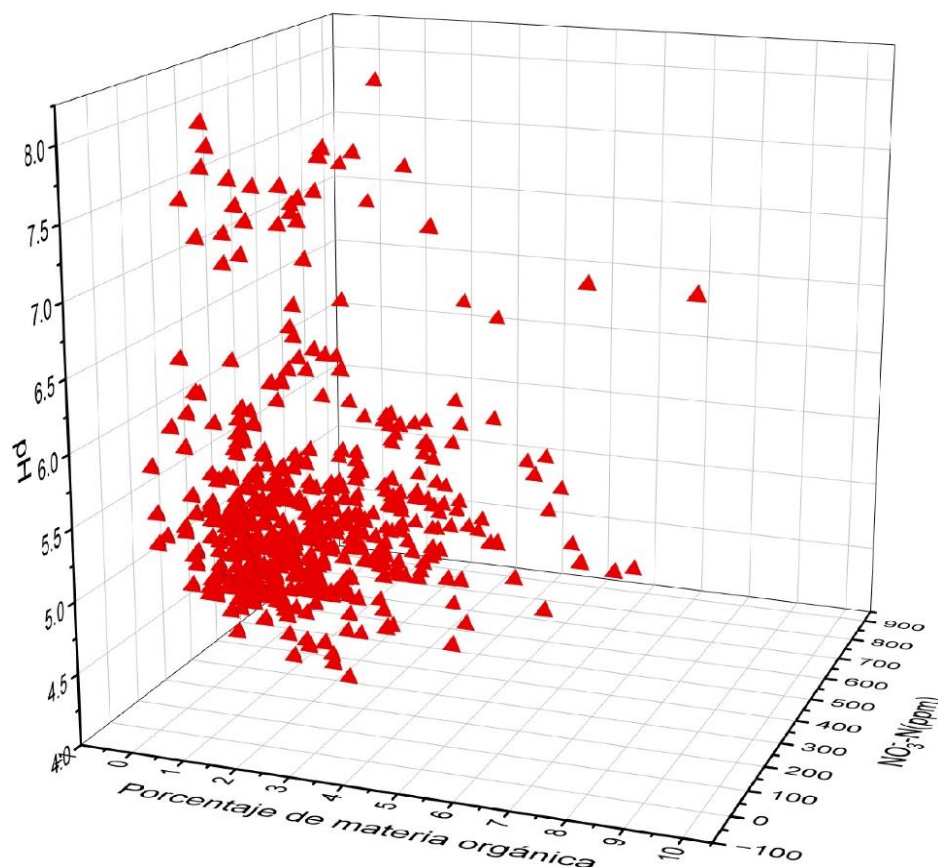


Figura 4. Relación de la MO en función del pH y la concentración de $\text{NO}_3^- \text{N}$.

Torres-Lozada L. *et al.* en 2021 [16] señalan que el uso excesivo y prolongado de fertilizantes inorgánicos a base de urea contribuye a la disminución del contenido de MO y nutrientes en el suelo, teniendo como consecuencia la disminución de su calidad, acidificación y contaminación. Además, recomiendan aplicar una fertilización combinada, integrando enmiendas orgánicas con fertilizantes a base de urea, con el fin de aumentar la tasa de mineralización del N y mantener un pH estable, evitando así la acidificación del suelo.

Posteriormente, se construyeron histogramas considerando las zonas con mayor y menor

concentración de datos (figura 4), usando como referencia dos rangos de pH: 4.5–6.0 (ácido a ligeramente ácido) con 437 muestras y 6.01–8.0 (ligeramente ácido a neutro a ligeramente alcalino) con 57 muestras que se observan en figura 5. La Figura 5a) muestra la distribución de la concentración de $\text{NO}_3^- \text{N}$ en ppm en suelos con pH entre 4.5 y 6.0, se observó una distribución asimétrica multimodal (múltiples picos), con una frecuencia de muestras en el rango de 0-300 ppm, siendo este rango de frecuencias donde se concentra el mayor número de muestras. De acuerdo con lo observado en esta figura, esto se asocia por la aplicación de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, la cual, al sufrir

nitrificación, libera iones H^+ que aceleran la acidificación del suelo y favorece la acumulación de NO_3^-N [17].

Por otra parte, la figura 5b) muestra los suelos con pH entre 6.01 y 8.0, se observó una distribución asimétrica unimodal (un solo pico) en el intervalo de 0-100 ppm con una frecuencia de aproximadamente 20 muestras, esta frecuencia disminuye progresivamente en conjunto con la concentración de NO_3^-N , esto se asocia a una mejor absorción de NO_3^-N por

las plantas de acuerdo con condiciones más estables de pH.

El porcentaje de MO presentó una distribución asimétrica unimodal en ambos rangos de pH analizados. La figura 5c) presentó una mayor frecuencia en el número de muestras con valores de MO entre 0.5 y 2.5%, este comportamiento se atribuye a la reducción en la actividad microbiana que ocurre en suelos ácidos, lo cual ralentiza la descomposición de la MO y promueve su acumulación [18].

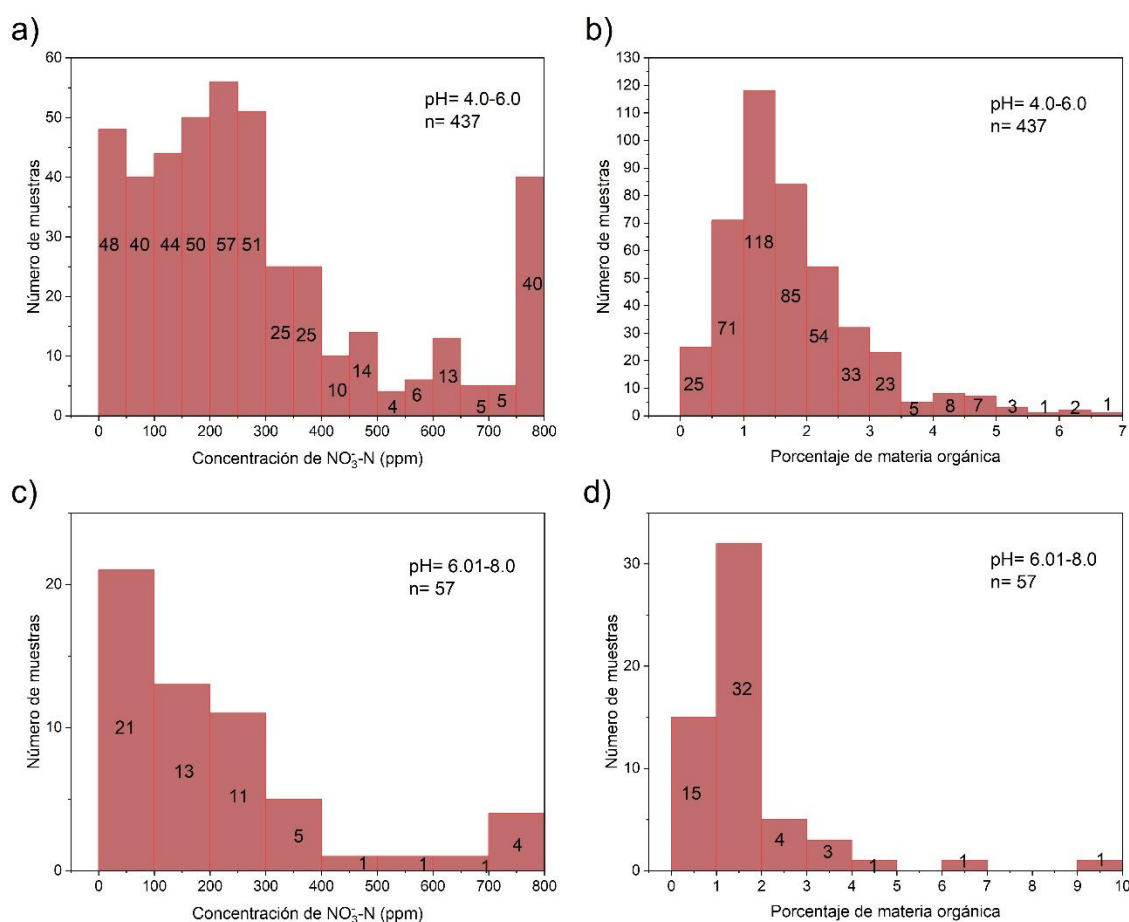


Figura 5. Histogramas de NO_3^-N y MO del suelo, agrupados por intervalos de pH: a) NO_3^-N pH= 4.5-6.0, b) MO pH= 4.5-6.0, c) NO_3^-N pH= 6.01-8.0 y d) MO pH= 6.01-8.0.

Adicionalmente, en la figura 5d) se observó una disminución progresiva en la frecuencia de muestras a medida que aumenta el contenido de MO. La mayoría de las muestras se concentraron en el intervalo de 1.0 y 2.0%, con un máximo de 32 muestras, lo que indica que, aunque hay una presencia de MO, su acumulación es menos pronunciada que en suelos ácidos. Esto podría estar relacionado con una mayor actividad microbiana en suelos ligeramente alcalinos, que acelera la descomposición de la MO.

De acuerdo con Guo-J *et al.* en 2010 [19] entre las décadas de 1980 y 2000 encontraron que el uso excesivo de fertilizantes sintéticos nitrogenados, provocaron una acidificación significativa en el pH del suelo con disminuciones entre 0.13 y 0.80 unidades. El control del pH es fundamental para los procesos celulares básicos y es necesario para mantener el crecimiento y desarrollo normal de las plantas [20]. En el presente estudio se encontró que la acumulación de NO_3^- -N es favorecida principalmente en condiciones de pH bajo por la aplicación continua de fertilizante de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, de acuerdo con la encuesta realizada en Febrero de 2025, con una representación del 9.7% del total de las 494 muestras analizadas. Se asume que la acidificación de los suelos ocurre principalmente por la aplicación continua de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ sin previo análisis de suelo, aunque no se mencionan las cantidades exactas que aplican los participantes encuestados, altos niveles de N en la fertilización pueden conducir a la acidificación del suelo directa e indirectamente [19].

La figura 6 muestra la concentración en ppm de los principales macronutrientes del suelo (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , K^+ , P^{5+} , NH_3 -N y NO_3^- -N) del municipio de Ixtenco, diferenciados en dos rangos 4.0-6.0 (figura 6a) y 6.01-8.0 (figura 6b). Cada caja representa el rango intercuartílico (IQR), que abarca el 50% central de los datos, mientras que los bigotes indican la extensión de los valores dentro de 1.5 veces el IQR. Los puntos fuera de estos límites corresponden a valores atípicos. En la figura 6a) se observó una menor concentración y disponibilidad de cationes básicos como Ca^{2+} y Mg^{2+} , así como una marcada limitación de P debido a su fijación. Aunque el NH_3 -N es bajo, el NO_3^- -N presenta concentraciones elevadas y una dispersión considerable en suelos ácidos, indicando su favorable acumulación en condiciones de pH bajo. Este fenómeno, se asocia a una menor absorción de NO_3^- -N por las plantas que, de acuerdo con Alves *et al.* en 2019 [21] mencionan que la intensa acidificación del suelo a lo largo de varios años decrece el contenido de Ca^{2+} , K^+ y Mg^{2+} y se incrementa el contenido de aluminio. Sin embargo, algunos mecanismos reguladores que vinculan estos nutrientes con la interacción del pH del suelo y las plantas aún no están claros, ya que, algunos transportadores de NO_3^- como los AtNPF7.3/NRT1.5 (proteínas de membrana que permiten el movimiento de los iones NO_3^- dentro de las células vegetales) afectan la distribución de NO_3^- , K^+ y otros nutrientes [20]. Por otro lado, en la figura 6b), la disponibilidad de Ca^{2+} , Mg^{2+} y P^{5+} es notablemente mayor, mientras que el K^+ también muestra una mejor

disponibilidad.

En este estudio se enfatiza que el uso inadecuado de fertilizantes puede desencadenar en procesos de acidificación del suelo, siendo este fenómeno una de las principales causas de degradación química del suelo. La gestión de suelos ácidos sigue siendo un reto importante que requiere inversión. Se requiere un análisis y conocimiento profundos para diseñar, adoptar y ampliar un enfoque adecuado para la gestión de suelos ácidos.

Sin embargo, las prácticas para llevar un manejo sostenible del suelo requieren de una

fertilización adecuada y óptima de fertilizantes que se pueden obtener de un análisis de suelo. Así como el uso adecuado de enmiendas orgánicas e inorgánicas como composta, estiércol, cal, biocarbón, entre otros, ya que la salud o fertilidad del suelo es una propiedad manejable y su manejo es fundamental para garantizar la nutrición de los cultivos y lograr una producción sostenible, caso contrario, las consecuencias son la acidificación del suelo, pérdida de MO, limitación de nutrientes y erosión del suelo [22].

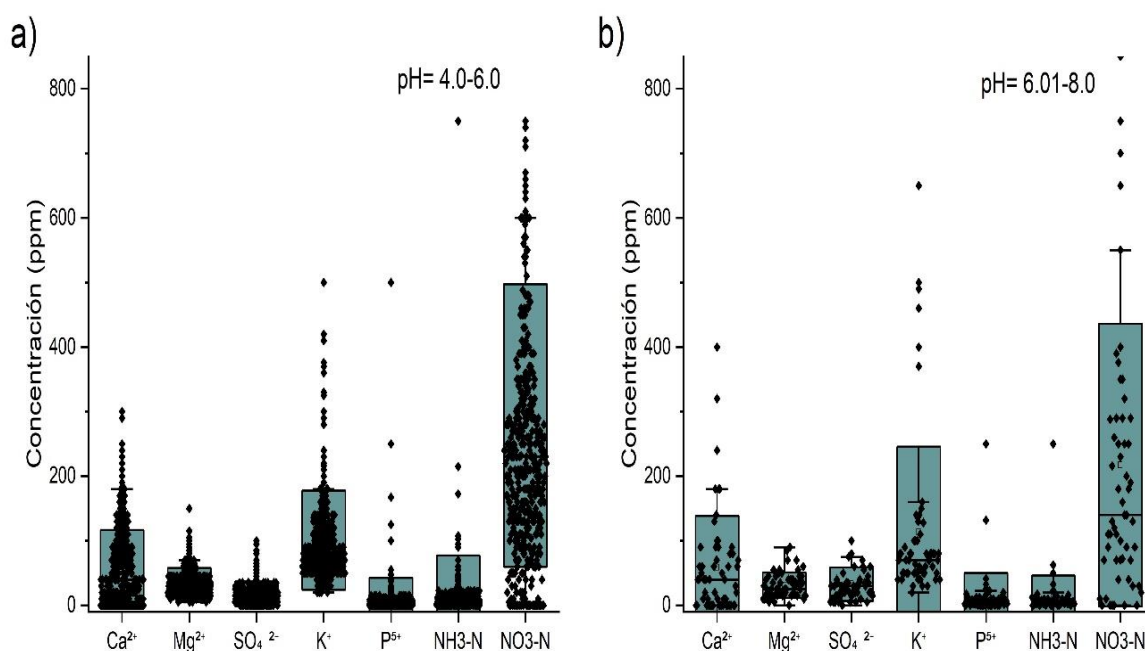


Figura 6. Relación de la variabilidad en la concentración de nutrientes evaluando dos rangos de pH a): 4.0-6.0 y b) 6.01-8.0.

CONCLUSIÓN

El estudio realizado en los suelos de Ixtenco, Tlaxcala, muestra que la concentración de NO_3^- -N está estrechamente relacionada con el pH y el contenido de MO del suelo. Se encontró que la mayor acumulación de NO_3^- -N ocurre en suelos ácidos (pH 4.5-6.0) y con bajo contenido de MO, lo que sugiere que el uso intensivo de fertilizantes nitrogenados, en particular la urea, acelera la acidificación del suelo. Esto no solo impacta la fertilidad del suelo, sino que también representa un riesgo ambiental al favorecer la contaminación de cuerpos de agua.

Los resultados refuerzan la necesidad de aplicar estrategias de manejo sostenible, como la fertilización combinada con enmiendas orgánicas, para mantener un equilibrio en la disponibilidad de nutrientes y evitar la degradación del suelo. Además, se recomienda monitorear continuamente los niveles de NO_3^- -N y ajustar las dosis de fertilizantes nitrogenados según las condiciones del suelo, asegurando una mayor eficiencia en su absorción por las plantas y reduciendo los efectos negativos sobre el ecosistema agrícola.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no tienen ningún conflicto de intereses con el contenido de este manuscrito.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Secretaría de Impulso Agropecuario por facilitar las instalaciones y el equipo necesario para la realización de este estudio, así como al Gobierno del Estado de

Tlaxcala por su apoyo. Extendemos nuestro reconocimiento a los productores de la comunidad de San Juan, Ixtenco, Tlaxcala, quienes, a través del cultivo de maíz, contribuyen al sustento de una tradición agrícola fundamental y a la alimentación de la población tlaxcalteca.

REFERENCIAS

- [1]. Ewunetu A, Simane B, Teferi E, Zaitchik BF. Mapping and quantifying comprehensive land degradation status using spatial multicriteria evaluation technique in the headwaters area of Upper Blue Nile River. Sustainability (Switzerland). 2021;13(4):1–28. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2244>
- [2]. Hao T, Zhu Q, Zeng M, Shen J, Shi X, Liu X, *et al.* Impacts of nitrogen fertilizer type and application rate on soil acidification rate under a wheat-maize double cropping system. J Environ Manage. 2020; 270: 110888. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479720308185>
- [3]. Tkaczyk P, Mocek-Płóćiniak A, Skowrońska M, Bednarek W, Kuśmierz S, Zawierucha E. The mineral fertilizer-dependent chemical parameters of soil acidification under field conditions. Sustainability (Switzerland). 2020;12(17):10.3390/su12177165. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/17/7165>
- [4]. Shi R-y, Ni N, Nkoh JN, Li J-yu, Xu R-kou, Qian W. Beneficial dual role of biochars in

inhibiting soil acidification resulting from nitrification. *Chemosphere*. 2019; 234: 43–51. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653519312597>

[5]. Shi R-y, Liu Z-d, Li Y, Jiang T, Xu M, Li J-yu, *et al.* Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application. *Soil Tillage Res.* 2019;185:77–84. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198718310158>

[6]. Tao L, Li F-b, Liu C-s, Feng X-h, Gu L-l, Wang B-r, *et al.* Mitigation of soil acidification through changes in soil mineralogy due to long-term fertilization in southern China. *Catena* (Amst). 2019;174:227–34. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816218305186>

[7]. Pan X, Baquy MA-A, Guan P, Yan J, Wang R, Xu R, *et al.* Effect of soil acidification on the growth and nitrogen use efficiency of maize in Ultisols. *J Soils Sediments*. 2020 Mar 1;20(3):1435–45. Disponible en:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11368-019-02515-z>

[8]. Dal Molin SJ, Ernani PR, Gerber JM. Soil acidification and nitrogen release following application of nitrogen fertilizers. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 2020;51(20):2551–8. Disponible en:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00103624.2020.1845347>

[9]. Mere Bergamasco MA, Boscov Braos L, Guidini Lopes I, Pessôa Cruz MC. Nitrogen

Mineralization and Nitrification in Two Soils with Different pH Levels. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 2019;50(22):2873–80. Disponible en:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00103624.2019.1689250>

[10]. Municipio de Ixtenco, Tlaxcala. (s/f). Gob.mx. Disponible en:

<https://ixtenco.gob.mx/tu-municipio/medio-fisico>

[11]. NOM-021-RECNAT-2000: Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2000. Disponible en:

<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280.pdf>

[12]. Manual de Instrucciones HI 83225 Grow Master para el Análisis de Nutrientes en Agricultura. Disponible en:

<https://www.manualslib.es/manual/19128/Hanna-Instruments-Hi-83225.html#product-HI%2083225>

[13]. Beltrán-Morales FA, Nieto-Garibay A, Murillo-Chollet JSA, Ruiz-Espinoza FH, Troyo-Dieguez E, Alcalá-Jauregui JA, *et al.* Inorganic nitrogen, phosphorus and potassium content of natural fertilizers for use in organic agriculture. *Terra Latinoamericana.* 2019;37(4):371–8. Disponible en:

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792019000400371

[14]. El Mouridi Z, Ziri R, Douaïk A, Bennani S, Lembaid I, Bouharou L, *et al.* Comparison Between Walkley-Black and Loss On Ignition

Methods for Organic Matter Estimation in Different Moroccan Soils. Ecological Engineering and Environmental Technology. 2023;24(4):253–9. Disponible en:

<https://www.ecoet.com/Comparison-between-Walkley-Black-and-Loss-on-Ignition-Methods-for-Organic-Matter,163121,0,2.html>

[15]. Marquez G, Antonio Hernández J, García M, Hernández M, López B, Castillo EP. Análisis comparativo del porcentaje de materia orgánica y su relación con la textura del suelo en las regiones de Tlaxcala. Alianzas y Tendencias BUAP. 2025; 10(37): 37-63. Disponible en:

<http://doi.org/10.5281/zenodo.15062291>

[16]. Torres-Lozada LK, Escobar-Medina D, Soto-Paz J, Daza-Torres MC, Torres-Lozada P. Evaluation of Nitrogen Mineralization in an Acid Soil with Inorganic and Organic Fertilization. Ingenieria (Colombia). 2021;26(2):197–212. Disponible en:

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

[17]. Ye JY, Tian WH, Zhou M, Zhu QY, Du WX, Zhu YX, *et al.* STOP1 activates NRT1.1-mediated nitrate uptake to create a favorable rhizospheric pH for plant adaptation to acidity. Plant Cell. 2021;33(12):3658–74. Disponible en:

<https://academic.oup.com/plcell/article/33/12/3658/6370715?login=true>

[18]. Paul EA. Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry. Academic Press; 2014. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/book/9780124>

[159556/soil-microbiology-ecology-and-biochemistry](#)

[19]. Guo JH, Liu XJ, Zhang Y, Shen JL, Han WX, Zhang WF, *et al.* Significant acidification in major chinese croplands. Science. 2010;327(5968):1008–10. Disponible en: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1182570>

[20]. Feng H, Fan X, Miller AJ, Xu G. Plant nitrogen uptake and assimilation: Regulation of cellular pH homeostasis. J Exp Bot. 2020;71(15):4380–92. Disponible en: <https://academic.oup.com/jxb/article/71/15/4380/5811180>

[21]. Quino Alves L, de Oliveira Denardin LG, Posselt Martins A, Anghinoni I, de Faccio Carvalho PC, Tiecher T. Soil acidification and P, K, Ca and Mg budget as affected by sheep grazing and crop rotation in a long-term integrated crop-livestock system in southern Brazil. Geoderma. 2019; 351: 197–208. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706118322365>

[22]. Agegnehu G, Amede T, Erkossa T, Yirga C, Henry C, Tyler R, *et al.* Extent and management of acid soils for sustainable crop production system in the tropical agroecosystems: a review. Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science. 2021; 71:852–69. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09064710.2021.1954239>