







INDICADORES DE CALIDAD COMO HERRAMIENTAS ÚTILES PARA EVALUAR EL ESTADO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO

QUALITY INDICATORS AS USEFUL TOOLS FOR ASSESSING SOIL FERTILITY STATUS

¹Eric Guillermo Echeverría-Pérez , ^{2S}Ernesto Castañeda-Hidalgo , ³Celerino Robles , ³Verónica Martínez-Gallegos , ²Gisela M. Santiago-Martínez , ²Gerardo Rodríguez-Ortiz 

^{1,2} Estudiante, investigador. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Ex hacienda de Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. C.P. 71233. ²Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Ex hacienda de Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. C.P. 71233. ³Instituto Politécnico Nacional. CIDIIR-Unidad Oaxaca. Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. C.P. 71230. [§]Autor de correspondencia:(casta_h50@hotmail.com)

RESUMEN

La evaluación de la fertilidad del suelo de un área o región es una herramienta básica que ayuda a cuantificar las propiedades físicas, químicas y biológicas para realizar el manejo sostenible de los nutrientes del suelo. El muestreo y el análisis del suelo son técnicas indispensables para evaluar su estado y potencial de uso, se practican ampliamente desde escalas de laboratorio y campo. Sin embargo, la elección de las propiedades y la interpretación de las mediciones no son sencillas, debido a la complejidad, la especificidad del sitio y características de los suelos. A nivel mundial en la agricultura tradicional, es poco usual evaluar la fertilidad de los suelos, al considerarse costoso y tardado. El objetivo de este artículo es analizar y discutir la contribución de los indicadores de calidad como herramientas útiles para evaluar el estado de la fertilidad de suelos agrícolas mediante la revisión de conceptos, enfoques de evaluación y selección e interpretación de los indicadores químicos (pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, aluminio, hierro y micronutrientes zinc, boro, molibdeno, manganeso y cloro), físicos (densidad aparente, textura, porosidad y estructura) y biológicos (actividad y biodiversidad de las comunidades microbianas). El monitoreo y registro del estado de la fertilidad del suelo es de suma importancia en todo sistema agrícola, puesto que los rendimientos dependen de la capacidad del

suelo para proveer a la planta todos los nutrientes necesarios para su desarrollo.

Palabras clave: Calidad de suelos, propiedades físicas del suelo, propiedades químicas del suelo.

ABSTRACT

The evaluation of the soil fertility of an area or region is a basic tool that helps us quantify the physical, chemical and biological properties to carry out the sustainable management of soil nutrients. Soil sampling and analysis are essential techniques to assess its status and potential use, they are widely practiced from laboratory and field scales. However, the choice of properties and the interpretation of the measurements are not simple, due to the complexity, the specificity of the site and the characteristics of the soils. Worldwide, in traditional agriculture, it is unusual to assess soil fertility, as it is considered costly and time consuming. The objective of this article is to contribute to expand the knowledge of soil quality based on its functions by reviewing in terms of definition, evaluation approaches, and selection and interpretation of chemical indicators (pH, electrical conductivity, exchange capacity cationic, the content of organic matter, nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, aluminum, iron and zinc, boron, molybdenum, manganese and chlorine micronutrients), physical (bulk density, texture, porosity and structure) and biological (activity and biodiversity of microbial communities). Monitoring and recording the state

of soil fertility is extremely important in any agricultural system, since yields depend on the ability of the soil to provide the plant with all the necessary nutrients for its development.

Index words: Analysis, oil quality, soil physical properties, soil chemical properties.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales factores que están asociados a la baja capacidad productiva de los sistemas de cultivo es la pérdida de la fertilidad del suelo, siendo esta el conjunto de procesos dinámicos físicos, químicos y biológicos que abonan a la sustentabilidad de los agroecosistemas (Orellana-Salas y Lalvay-Portilla, 2018). El desconocimiento de la fertilidad provoca graves problemas en la producción, rendimiento y degradación de los suelos debido a la falta de información básica que permita establecer programas de manejo en la producción agrícola sustentable. Dentro de la agricultura tradicional es poco usual evaluar la fertilidad de suelos, por considerarse costoso y tardado (Vega-Blancas, Fernández-Reynoso, Macedo-Cruz, Ríos-Berber y Ruiz-Bello, 2022).

Los sistemas agrícolas modernos a nivel mundial se caracterizan por el manejo intensivo del suelo, principalmente para producción hortícola, lo que provoca problemas en el suelo como: deterioro de la calidad y fertilidad, de producción, rendimiento y degradación; asimismo, el uso inadecuado de los recursos agua, suelo, flora y fauna asociados con el uso excesivo de fertilizantes

químicos sintéticos y el mal manejo del estado nutrimental (Valera, Rodríguez y Martínez, 2019).

El contar con información disponible permitirá a los productores, científicos e interesados, implementar estrategias de mejora y manejo de los suelos agrícolas a partir del conocimiento de sus propiedades físicas, químicas y biológicas para contribuir en la autosuficiencia, seguridad y soberanía alimentaria de los agricultores (Cotler, Corona y Galeana-Pizaña, 2020).

El objetivo general de este artículo de revisión es analizar y discutir la contribución de los indicadores de calidad como herramientas útiles para evaluar el estado de la fertilidad de suelos agrícolas. Se realizó mediante la técnica de la investigación documental a partir de la revisión bibliográfica detallada de las propiedades físicas, químicas y biológicas de mayor importancia para la valoración de la fertilidad de los suelos agrícolas, en especial, aquellos donde se practica la agricultura tradicional de temporal y de riego con cultivos básicos.

Se realizó un análisis detallado de los aspectos conceptuales de la fertilidad de los suelos agrícolas, y posteriormente un análisis de la contribución de las principales variables para los factores físicos (cuatro variables), químicos (doce variables) y biológicos (siete variables). Finalmente se realizan comentarios a manera de conclusión.



Figura I. La degradación del suelo como consecuencia del cambio global incluyendo factores climáticos y antrópicos (Muñoz-Rojas et al., 2021).

DESARROLLO

La fertilidad de los suelos agrícolas

Para la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y alimentación (FAO, 2020), es la habilidad del suelo para suplementar nutrientes esenciales y agua a las plantas en cantidades adecuadas y condiciones para su crecimiento y reproducción en ausencia de sustancias tóxicas que puedan inhibir el crecimiento de las plantas.

La degradación del suelo está asociada a procesos antrópicos como la deforestación, la excesiva recurrencia e intensidad de incendios forestales, el sobrepastoreo, y otras actividades intensivas (Figura 1), como la agricultura y la minería (Muñoz-Rojas, Delgado-Baquerizo y Lucas-Borja, 2021).

Es urgente combatir la degradación y garantizar la seguridad alimentaria, mejorando su fertilidad y reduciendo el uso de fertilizantes sintéticos (Hueso-González, Muñoz-Rojas y Martínez-Murillo, 2018).

A continuación, se desarrolla el estudio de fertilidad de suelos agrícolas considerando aspectos más representativos desde las dimensiones física, química y biológica.

Fertilidad física de los suelos agrícolas

Es la capacidad del suelo de proporcionar condiciones físicas óptimas que apoyen la productividad, la reproducción y la calidad de planta (Núñez-Peñaloza, Cristóbal-Acevedo, Hernández-Acosta y Villanueva-Morales, 2022). La condición física de un suelo determina la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad y la retención de nutrientes. Las principales variables de la fertilidad física de los suelos agrícolas que se incluyen en este apartado son: la densidad aparente, la textura, la porosidad del suelo y la estructura del suelo.

Densidad aparente de los suelos agrícolas (D_a)

Es una de las propiedades físicas del suelo más importantes, a partir de ella se pueden determinar otras propiedades y los cambios que sufre el suelo por asentamiento después de ser removido (Mendoza, Giler y Simbaña, 2022), por compactación, por el peso ejercido de los implementos agrícolas y por las láminas de riego aplicadas (Cid-Lazo, López-Seijas, Herrera-Puebla y González-Robaina, 2021).

Permite analizar la facilidad de penetración de las raíces al suelo, la predicción de la transmisión de agua, la transformación de los porcentajes de humedad gravimétrica del suelo en términos de humedad volumétrica, calcular las láminas de agua para el riego, calcular la porosidad total de un suelo cuando se conoce la densidad de las partículas y estimar la masa de la capa arable (Urriola, 2020).

Típicamente la D_a del suelo varía en un rango de 1.0 a 1.7 g cm⁻³ y generalmente aumentan con la profundidad en el perfil del suelo (USDA, 1999). Si la D_a aumenta, se incrementa la compactación, se limitan las condiciones de retención de humedad y crecimiento de las raíces (Bünemann, Bongiorno, Bai, Creamer, De Deyn, de Goede, Fleskens, Geissen, Kuyper, Mäder, Pulleman, Sukke, Groenigen y Brussaard, 2018), reflejándose en la disminución de la velocidad de infiltración del agua, lo cual puede provocar anegamientos en los suelos (Schoonover y Crim, 2015).

Existen diferentes métodos para estimar la D_a dentro de los que destacan:

1. El método del cilindro. Utilizado por el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), dicha estimación termogravimétrica presenta la desventaja de requerir de un horno de alto costo y los resultados son obtenidos después de 24 horas (Salazar-Calvo, González-Venegas, Corrales-Valverde, Lacayo-Vega, Carrillo-Montoya y Montero-González, 2020).

2. Método coreano. Es una metodología *in situ*, se realiza en un periodo corto de tiempo, no emplea equipo especializado y es de bajo costo. Se basa en el principio de Arquímedes el cual indica que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje o fuerza vertical hacia arriba igual al peso del fluido expulsado, obteniéndose la proporción de la fase sólida, líquida y gaseosa, para posteriormente realizar el cálculo de la Da (Salazar-Calvo et al. 2020).
3. La NOM 021-RECNAT 2000, sugiere dos métodos de estimación: El método de la parafina y el método del picnómetro, ambos se calculan a partir del conocimiento de dos parámetros: la masa del suelo y el volumen total, es decir, el volumen de los sólidos y el volumen ocupado por el espacio poroso.
4. Método de la probeta. En este método, se coloca suelo previamente pesado en la probeta graduada y tapada, se golpea un número determinado de veces sobre una superficie y se mide cuanto descendió del nivel original el volumen, estableciendo la relación entre el peso total y el volumen final en la probeta (Rosales, 2019).

Textura del suelo

Indica el contenido de partículas de arena, limo y arcilla en el suelo. Esta variable influye directamente en otras variables como la Da, la porosidad, el movimiento y el almacenamiento de agua en el suelo (FAO, 2022).

Se calcula a través del uso del triángulo de texturas (Figura 2), en donde muestra las 12 clases texturales dentro del sistema propuesto por USDA, (1977) accediendo con los porcentajes de las fracciones granulométricas aportados por el análisis mecánico o análisis de textura (Figura 2).

Los suelos arcillosos almacenan dos veces más agua que un suelo arenoso, se puede regar con menos frecuencia; sufre menos pérdida de nutrientes por lixiviación; son más difíciles de labrar y son más susceptible a la compactación; por lo tanto, se recomienda agregar materia orgánica como el compost, estiércol, abono verde y lombríhumus para mejorar la condición física del suelo (Schoonover y Crim, 2015).

El suelo franco se considera una textura ideal para los sistemas agrícolas, al presentar una mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla, manifestándose en un equilibrio entre permeabilidad al agua, retención de agua y los nutrientes disponibles (Herrera, 2019).

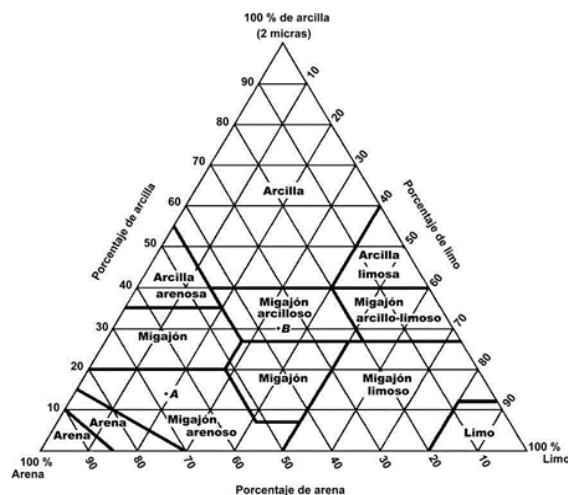


Figura 2. Triángulo de clases texturales (USDA, 1999).

Porosidad del suelo

Es un factor importante en la infiltración, conductividad hidráulica y retención de agua (Melendres, Zermeño, Ramírez, Cárdenas y Cadena, 2017). En el suelo se encuentran diferentes tamaños de poros con una función específica; los grandes y medianos facilitan la aireación del suelo, la infiltración del agua, permiten un equilibrio aire/agua, garantizan el desarrollo del cultivo, favorecen la absorción de nutrientes por las raíces y aumentan la actividad biológica del suelo. Los microporos retienen el agua en contra de la acción de la gravedad (Barragán, 2021).

La pulverización excesiva del suelo ocasiona una disminución del volumen de poros y la compactación de este, impidiendo la penetración de las raíces, reduciendo la circulación de oxígeno, agua, nutrientes y solutos a las plantas cultivadas; una labranza reducida favorece el mantenimiento de la continuidad de los macroporos (Barragán, 2021).

Estructura del suelo

Es la capacidad que tiene la masa de suelo de disgregarse por sí misma en separaciones de distintas formas y tamaños, la cual se puede evaluar mediante la estabilidad de los agregados. Influye en el movimiento del agua y la retención hídrica, drenaje, aireación, penetración de las raíces, ciclo de nutrientes y rendimiento de los cultivos. Esta propiedad se asocia con la porosidad del suelo para determinar la capacidad de sostener la actividad agrícola (Rabot, Wiesmeier, Schlüter and Vogel, 2018); así mismo, es de importancia en el control de la erosión y el enraizamiento de las plantas (Bosch-Serra, Mateo-Marín, Molina, Poch y Boixadera-Bosch, 2022), favorece la infiltración, la retención de humedad, resistencia mecánica a la penetración, desarrollo de raíces, la aireación y la estabilidad ecológica (Martínez-Gamiño, Osuna-Ceja y Espinosa-Ramírez, 2019).

A continuación, se describe la clasificación de la estructura del suelo de acuerdo con la FAO (2022):

- 1) Estructuras granulares y migajosas. Partículas individuales de arena, limo y arcilla agrupadas en granos pequeños casi esféricos. Facilitan la circulación del agua, por lo general, se encuentran en el horizonte A de los perfiles de suelos.
- 2) Estructuras en bloques o bloques subangulares. Partículas que se agrupan en bloques casi cuadrados o angulares, los bloques relativamente grandes indican que el suelo resiste la penetración y el movimiento del agua, suelen encontrarse en el horizonte B cuando hay acumulación de arcilla.
- 3) Estructuras prismáticas o columnares. Son partículas que han formado columnas o pilares verticales separados por fisuras verticales diminutas definidas. El agua circula con mayor dificultad y el drenaje es deficiente, se encuentran en el horizonte B cuando hay acumulación de arcilla.
- 4) Estructura laminar. Se compone de partículas agregadas en láminas o capas finas que se acumulan horizontalmente una sobre otra, a menudo las láminas se traslapan, lo que dificulta notablemente la circulación del agua, esta estructura se encuentra casi siempre en los suelos boscosos, en parte del horizonte A y en los suelos formados por capas de arcilla.

Fertilidad química de los suelos agrícolas

Es la capacidad del suelo para proveer un ambiente químico apropiado y nutritivo para la producción, reproducción y calidad de plantas, de manera que soporte los procesos físicos y biológicos (Díaz-García, 2019). En este apartado se analizan los indicadores de mayor importancia acorde a Villalba-Martínez, Merino-García y Etchevers-Barra, (2020) que incluyen a: pH, materia orgánica del suelo (MOS), capacidad de intercambio catiónico (CIC), Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Aluminio (Al), Hierro (Fe) y principales microelementos.

Tabla I. Valores de referencia para la clasificación del suelo en relación con el valor del pH.

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	<5.0
Moderadamente ácido	5.1-6.5
Neutro	6.6-7.3
Medianamente alcalino	7.4-8.5
Fuertemente alcalino	>8.5

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000.

El pH del suelo es una propiedad química que indica que tan ácida o alcalina es la solución del suelo en donde las raíces y los microorganismos toman sus nutrientes, siendo una escala de medición cuyo rango de fluctuación es de 0 a 14 y se basa en el principio de que la constante de equilibrio de la disociación del agua es 10^{-14} (Osorio, 12). Los suelos de reacción ácida poseen $\text{pH} < 5.5$; donde prevalece una elevada concentración de iones hidrógeno $[\text{H}^+]$, presentando limitaciones para el crecimiento de la mayoría de las plantas cultivadas, afectando principalmente la disponibilidad de algunos elementos como el P y la toxicidad debido a la presencia de Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} y NO_3 , que liberan H^+ a la solución del suelo (Delgado et al. 2018), provocando un efecto antagónico para los cultivos agrícolas (Martínez-Rodríguez, Can-Chulim, Ortega-Escobar, Bojórquez-Serrano, Cruz-Crespo, García-Paredes y Madueño-Molina, 2021). La NOM-021-RECNAT-2000 indica su medición con un método electrométrico en agua destilada en una suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo-agua 1:2, cuyos valores de referencia se muestran en la Tabla I.

Los factores que contribuyen con la acidificación de los suelos son: el material parental, laboreo intensivo que favorece la remoción de Ca, Mg y K, aplicación de fertilizante de reacción ácida y la lixiviación de bases intercambiables, por mencionar algunos (Martínez-Rodríguez et al. 2021). La aplicación de carbonatos, óxidos, hidróxidos, y silicatos de calcio o magnesio se denomina encalado y permite aumentar el pH de los suelos, mejorando la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana (Mañana,

Covacevich, Sainz, Barbieri y Giselle-Commatteo, 2021).

Materia orgánica del suelo (MOS)

Es parte de la estructura del suelo y participa en procesos como la retención de agua, desintoxicación de sustancias químicas antropogénicas, secuestro de carbono, el ciclo de los nutrientes y el suministro de energía a los microorganismos del suelo (Barrezueta-Unda, Cervantes-Alava, Ullauri-Espinoza, Barrera-León y Condoy-Gorotiza, 2020). Si el contenido de MO es alto, la fertilidad del suelo suele ser alta, asociada a la liberación de N, P y S, y que por su acción quelante, está relacionada con la disponibilidad de Fe, Mn, Cu y Zn, debiéndose tomar en cuenta el pH del suelo, ya que, en pH ácido, se dificulta la disposición de los elementos mencionados (Martínez-Rodríguez et al. 2021). Para la determinación de la MOS se utiliza el método propuesto por Walkley y Black expresado en porcentaje (%) y se basa en la oxidación húmeda de la muestra de suelo con dicromato de potasio en una solución ácida (NOM-021-RECNAT-2000).

La degradación del suelo y, en particular, la pérdida de la fracción orgánica, y de la biodiversidad de este, son algunos de los problemas ambientales de mayor gravedad de este siglo que, junto con los efectos del cambio climático, plantea serios riesgos para la sostenibilidad de los ecosistemas terrestres y la seguridad alimentaria mundial (Timmis y Ramos, 2021). En la Tabla 2 se detallan los valores de referencia de la MOS en los diferentes tipos de suelos.

Tabla 2. Valores de referencia para clasificar la concentración de materia orgánica en suelos minerales y volcánicos.

Clase	Materia orgánica (%)	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 - 6.0	0.6 - 1.5
Medio	6.1 - 10.9	1.6 - 3.5
Alto	11.0 - 16.0	3.6 - 6.0
Muy alto	> 16.1	> 6.0

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Es la carga eléctrica negativa de las arcillas y materia orgánica del suelo y puede ser permanente o dependiente del pH del suelo (López-Báez, Reynoso-Santos, López-Martínez, Villar-Sánchez, Camas-Gómez y García-Santiago, 2019). Representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K, NH₄) para ser intercambiados por otros cationes o iones de hidrógeno presentes en la solución del suelo y liberados por las raíces (FAO, 2022).

Para la determinación de la CIC la NOM-021-RECNAT-2000 establece que se realizará

empleando acetato de amonio IN a pH 7.0 como solución saturante (Tabla 3).

Los principales iones asociados con la CIC en los suelos son los cationes intercambiables calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺), sodio (Na⁺) y potasio (K⁺) (Ortiz, 2020). Una baja CIC indica una baja habilidad de retener nutrientes en el suelo, ocasionando una mayor probabilidad de desarrollar deficiencias de potasio (K⁺), magnesio (Mg²⁺) entre otros cationes; mientras que los suelos con una CIC alta son menos susceptibles a la lixiviación de cationes, estas características predominan en suelos arcillosos o con una alta cantidad de materia orgánica (FAO, 2020).

Tabla 3. Interpretación de resultados de la CIC.

Clase	CIC (Cmol(+) kg ⁻¹)
Muy alta	> 40
Alta	25-40
Media	15-25
Baja	5-15
Muy Baja	>5

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000.

Contenido de macroelementos disponibles en los suelos

El N es un elemento indispensable para la nutrición de las plantas que pocas veces se encuentra presente en cantidades suficientes en el suelo para satisfacer las necesidades de los cultivos, comprende la suma del nitrógeno orgánico y amoniacal (López-Choque, 2020). La cantidad de

N que retorna al suelo luego de su mineralización contribuye con su disponibilidad para las plantas, parte del N que está contenido en las enmiendas debe ser mineralizado antes de que sea disponible, pues este N en la rizósfera continuamente recircula entre varias formas orgánicas no disponibles e inorgánicas disponibles (Pérez-Mesa, 2018).

Por otra parte, puede ocurrir la pérdida de N a través de procesos de desnitrificación y lixiviación, generando emisión de gases de efecto invernadero y eutrofización en los cuerpos de agua (Monsalve, Gutiérrez y Cardona, 2017). Existe relación estrecha entre el ciclo del C y el del N, debido a su acumulación en la materia orgánica del suelo, por lo que se le debe de dar importancia al contenido de N como factor principal en la productividad agrícola (Paramo, Rodríguez y Siachoque, 2022).

El fósforo (P) es un nutriente esencial para las plantas, animales y microorganismos en la forma de iones fosfatos PO_4^{3-} y HPO_4^{2-} . Forma parte de moléculas claves como el ADN, ARN, moléculas que transfieren energía como ATP, ADP, AMP, NAD(P) y de los lípidos de las membranas celulares (Nazareno et al. 2019). Estimula el desarrollo radicular, el crecimiento de las plantas y la fijación del nitrógeno por las leguminosas (Lima-Molina, Aguirre-Terrazas y Flores-Mariaza, 2020).

El ortofosfato inorgánico (P_i) es la única forma de P que se puede transportar a través de la membrana plasmática de las plantas y de los hongos (Ciapparelli, Fabrizio de Iorio, Santos y García, 2019). Su determinación se realiza mediante el procedimiento de Olsen y colaboradores para suelos neutros y alcalinos, y por el procedimiento de Bray y Kurtz para suelos neutros y ácidos (NOM-021-RECNAT-2000) (Tabla 4).

El potasio (K) cumple un papel importante en la translocación de azúcares, la formación de

almidón, la apertura y cierre de estomas (Willey, 2016), interviene en el crecimiento vegetativo, fructificación, maduración y calidad de los frutos, en la activación de más de 60 enzimas que actúan en diferentes procesos metabólicos; por ejemplo, la fotosíntesis, la síntesis de proteínas y carbohidratos (Taiz, Zeiger, Møller and Murphy, 2015).

En el suelo se encuentra en cuatro formas disponibles: en solución, intercambiable, no intercambiable y mineral. La cantidad de K^+ en la solución del suelo es mínima y rápidamente es absorbido por las plantas por estar inmediatamente disponible. Cuando el K^+ es absorbido y extraído por las plantas, es renovado y restituido inmediatamente por la cesión de formas menos accesibles ubicadas en las zonas de adsorción de los coloides minerales y orgánicos del suelo (INTAGRI, 2017).

La adición de cal permite remover el Al de los sitios intercambiables incrementando la disponibilidad de K^+ y otras bases intercambiables (Martínez-Rodríguez et al. 2021).

Entre los factores que determinan la disponibilidad de K^+ en el suelo se encuentran la cantidad y el tipo del mineral arcilloso, la CIC, el contenido del K^+ intercambiable, la capacidad del suelo para fijar el K^+ , humedad, temperatura, aireación, pH y la textura del suelo (Sadeghian-Khalajabadi y Arias-Suárez, 2018).

Tabla 4. Valores de referencia para clasificar la concentración de fósforo en suelos de acuerdo con la metodología empleada en su determinación.

Clase	P (Olsen)	P (Bray y Kurtz)	
		mg kg ⁻¹	
Bajo	< 5.5	< 15	
Medio	5.5-11	15-30	
Alto	>11	> 30	

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000.

El calcio (Ca) es un catión divalente (Ca^{2+}), requerido para varios roles estructurales en las paredes celulares y en las membranas celulares. Es un contra catión para aniones orgánicos e inorgánicos en la vacuola y la concentración de Ca^{2+} citosólico funciona como mensajero intracelular coordinando respuestas a numerosas señales de desarrollo y a cambios ambientales (Maldonado-Torres, Álvarez-Sánchez, Abarca-Cervantes y Almaguer-Vargas, 2020).

Sus funciones principales son como un factor metabólico o cofactor en varias actividades celulares, participa en la regulación de la reproducción sexual en las flores, en la germinación y elongación de los tubos de polen, la expansión celular en la maduración de frutos, en la despolimerización de pectinas y la degradación de xiloglucano, relacionados con la maduración de los frutos (Hocking, Tyerman, Burton and Gilliam, 2016).

En postcosecha, el Ca^{2+} es importante debido a su participación en las paredes celulares de los frutos, 60-75 % del total del fruto y que contribuye a su vida postcosecha, se ha reportado que su deficiencia está relacionada con el suministro requerido y adecuado en la etapa de crecimiento (Rivera, Ferreyra, Robledo, Selles, Arpaia, Saavedra y Defilippi, 2017).

El magnesio (Mg) se encuentra dentro de los materiales arcillosos del suelo y está asociado con el intercambio de cationes en la superficie de las arcillas, para volverse soluble, el Mg adsorbido en las partículas de arcilla debe ser reemplazado por un catión presente en la solución del suelo, requiriéndose dos iones de K^+ para reemplazar a

un ion de Mg^{2+} (Naranjo, García-Ocampo y Quiceno, 2018).

El Mg y el Ca son importantes para aliviar la toxicidad de Al en suelos ácidos (Ramos-Oseguera, Castro-Ramírez, León-Martínez, Álvarez-Solís y Huerta-Lwanga, 2019). Se enlistan los valores de referencia en suelos en relación con el contenido de nitrógeno (N), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) en suelos (Tabla 5).

El aluminio (Al) origina acidez en el suelo por la presencia de iones Al^{3+} e hidrógeno (H^+), por lo que la reducción del pH afecta a las características químicas y biológicas del suelo, reduciendo el crecimiento de las plantas y disminuyendo la disponibilidad de nutrientes como Ca, Mg, P y K; y favorece la acumulación de elementos tóxicos para las plantas como Al^{3+} y Mn (Calva y Espinosa, 2017).

El Hierro (Fe) es un micronutriente requerido por las plantas en cantidades menores comparado con los macronutrientes primarios. Está presente en dos estados de oxidación Fe^{2+} y Fe^{3+} (López, Cacoub, Macdougall, and Peyrin-Biroulet, 2016). Participa en la síntesis de hemoglobina, mioglobina, citocromos, enzimas y es esencial para la respiración, la función mitocondrial y producción de energía (Boutchuen, Zimmerman, Aich, Mohammad, Arabshahi and Palchoudhury, 2019); asimismo, es esencial para el grupo protésico de enzimas involucradas en la proliferación celular (Camaschella, 2017).

Tabla 5. Valores de referencia para la clasificación de suelos en relación con el contenido de N, K, Ca y Mg.

Clase	N (%)	K (Cmol(+) kg^{-1})	Ca (Cmol(+) kg^{-1})	Mg (Cmol(+) kg^{-1})
Muy bajo	<0.05	<0.2	<2	<0.5
Bajo	0.05-0.10	0.2-0.3	2-5	0.5-1.3
Medio	0.10-0.15	0.3-0.6	5-10	1.3-3.0
Alto	0.15-0.25	>0.6	>10	>3.0
Muy alto	>0.25			

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000.

El cobre (Cu) es un micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, participa en numerosos procesos fisiológicos y un cofactor esencial para muchas metaloproteínas (Valdivia, Acebedo, Armas, Custodio, García, Gonzales y Vásquez, 2018). El exceso de cobre en el suelo puede producir efectos tóxicos sobre las plantas, inhibir el crecimiento de la parte aérea y de la raíz, causar clorosis de hojas e incrementar la liberación de electrolitos de las células por daño a las membranas celulares (Ruscitti, 2017).

El Cu se absorbe como catión divalente (Cu^{2+}) en suelos aireados y como ion cuproso (Cu^+) en suelos pobres en oxígeno o inundados, la forma divalente forma quelatos fácilmente con varios componentes del suelo, juega un rol importante en la asimilación de CO_2 y la síntesis de ATP, es componente esencial de varias proteínas como la plastocianina que interviene en el sistema fotosintético y enzimas como la citocromo oxidasa involucrada en la cadena transportadora de electrones en las crestas mitocondriales, en la respiración celular (Colorado, Alvarado y Romero, 2012).

Los micronutrientes zinc, boro, molibdeno, manganeso y cloro están disponibles limitadamente en suelos calcáreos alcalinos típicos de las zonas áridas del norte de México a pesar de que las plantas requieren cantidades pequeñas de microelementos (Maciel-Torres, Figueroa-Viramontes, Jacobo-Salcedo, Pedroza-Sandoval, Trejo-Calzada y Encerrado-Alva, 2017); quizá se deba a que dichos elementos forman compuestos poco solubles en el suelo (Begum, Bordoloi, Singha y Ojha, 2018).

Existen valores de referencia en suelos para los microelementos hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn) y boro (B) (Tabla 6).

El suelo requiere un suministro constante de todos los nutrientes, incluidos los microelementos, ya que su déficit puede convertirse en un factor que repercute en el rendimiento y la calidad de los cultivos (Salgado-Pacheco, Myazin-Georgievich, Kozhokina-Nikolaevna y Brekhov-Timofevich, 2021); sobre todo en los periodos de floración y en la formación de frutos en los cuales el consumo de nutrimentos es más intenso (Peña y Cruz, 2020).

Tabla 6. Valores de referencia para la clasificación de suelos en relación con el contenido de Fe, Cu, Zn, Mn y B.

Clase	Fe	Cu	Zn	Mn	B
mg kg ⁻¹					
Deficiente	<2.5	<0.2	<0.5	<1.0	<0.39
Marginal	2.5-4.5		0.5-1.0		0.39-0.79
Adecuado	>4.5	>0.2	>1.0	>1.0	0.8-1.29
Alto					1.30-2.10
Muy alto					>2.10

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000.

Fertilidad biológica de los suelos agrícolas

Actualmente, los parámetros biológicos del suelo tienen gran relevancia en la interpretación de la fertilidad del suelo a nivel mundial (Gonzales-Torrico, Pacasa-Quisbert y Hurtado-Barrero, 2022), aportan considerables cantidades de biomasa al suelo mejorando sus propiedades físicas (Calderón-Medina, Bautista-Mantilla y Rojas-

González, 2018). Dentro de las principales variables que se consideran para los estudios de fertilidad biológica de suelos se consideran las siguientes:

1. El carbono orgánico del suelo (COS). Es el componente mayoritario de la MOS (Dabadie, Pérez, Arturi, Goya y Sandoval,

2018). Se relaciona con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas, ya que influye en las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, que definen su fertilidad y capacidad productiva (Sánchez, Harwood, Willson, Kizilkaya, Smeenk, Parker, Paul, Knezek and Robertson, 2004). Se vincula con la cantidad y disponibilidad de nutrientes del suelo, modifica la acidez y la alcalinidad hacia valores cercanos a la neutralidad, aumenta la solubilidad de varios nutrientes, asociado a la MOS, proporciona coloides de alta capacidad de intercambio catiónico, modifica la estructura y distribución del espacio poroso del suelo (Amores, 2020), mejora la retención de humedad y contribuye con estabilidad de suelos arcillosos al ayudar a aglutinar las partículas para formar agregados, forma parte fundamental del ciclo de carbono y tiene gran importancia en la mitigación a los efectos del cambio climático (FAO, 2022).

2. Biomasa microbiana en suelos. Es usada para medir parte del carbono orgánico contenido en el suelo, siendo ésta una medida indirecta de la cantidad de microorganismos existentes que permite reconocer los cambios ocurridos en el ambiente edáfico que es usada como un indicador de calidad y fertilidad del suelo y

sirve como almacenamiento (inmovilización) y fuente (mineralización) de nutrientes para los cultivos a través de procesos de inmovilización y mineralización (Sabahi, Veisi, Soufizadeh y Asilan, 2010).

3. Actividad microbiana del suelo. La mineralización de N, producto de la actividad microbiana, sigue la misma tendencia mostrada en la respiración, lo que indica que hay una relación directa entre actividad microbiana y tasa de mineralización de N (Abbasi y Khizar, 2012).
4. Ciclo del N en el suelo. Se relaciona con la actividad microbiana y fauna del suelo como las lombrices, nematodos, protozoarios, hongos, bacterias y artrópodos (Figura 3). La biología del suelo juega un papel fundamental en la composición del suelo y sus características, los procesos de descomposición de la materia orgánica y el almacenamiento de nutrientes que se encuentran dentro de los organismos del suelo impidiendo su pérdida por lixiviación (FAO, 2022).

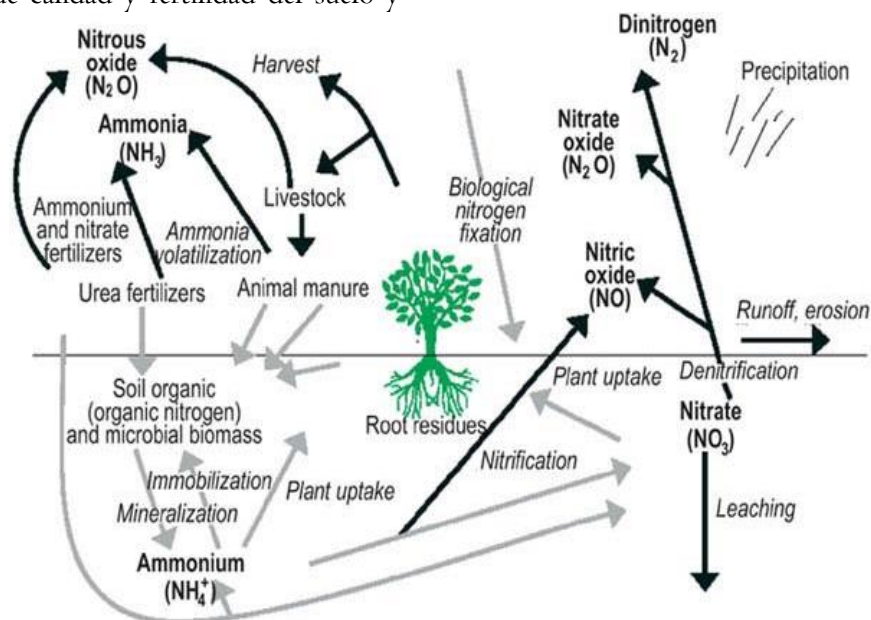


Figura 3. Ciclo del N y su importancia en el suelo (FAO, 2022).

5. Relación Carbono/Nitrógeno (C/N). La tasa de mineralización de N depende de su relación C/N y la capacidad de descomposición, origen y tratamiento de los materiales, método o duración del compostaje y de las condiciones ambientales del suelo (Antil, Bar-Tal, Fine and Hadas, 2011). Si la cantidad de N presente en los residuos orgánicos descompuestos es más alta que la requerida por los microorganismos, habrá mineralización neta con liberación de N inorgánico; si la cantidad de N en los residuos es igual a la cantidad requerida, no habrá mineralización neta; si la cantidad de N presente en los residuos es más pequeña que la requerida por los microorganismos, se requerirá inmovilización de N inorgánico adicional, proveniente del suelo; algunos estudios muestran que la relación C/N que genera un punto de equilibrio entre mineralización e inmovilización neta de N puede estar entre 20 y 40 (Mendoza et al. 2017).
6. El ciclo del Carbono. Los organismos que viven en el suelo son factores determinantes

para la circulación de nutrientes y del carbono en el suelo, una gran parte de la materia orgánica originada por la descomposición anual de los residuos vegetales se acumula en la superficie del suelo o en la zona radicular y se consume casi por completo por los organismos del suelo creando así una reserva de carbono con una rápida tasa de renovación, en muchos casos, entre 1 a 3 años (FAO, 2022) (Figura 4).

Los subproductos de este consumo microbiano resultan en emisiones de dióxido de carbono, (CO_2) y agua (H_2O), y una variedad de compuestos orgánicos designados como humus compuesto por sustancias difíciles de degradar resultando lento su descomposición (Colín, 2018). Los microorganismos del suelo disponen alta sensibilidad al contenido de carbono orgánico en el suelo tal como a la temperatura y tenor de agua por lo que aumentan la respiración en tenores elevados de carbono, temperaturas elevadas y condiciones más húmedas en el suelo (FAO, 2022).

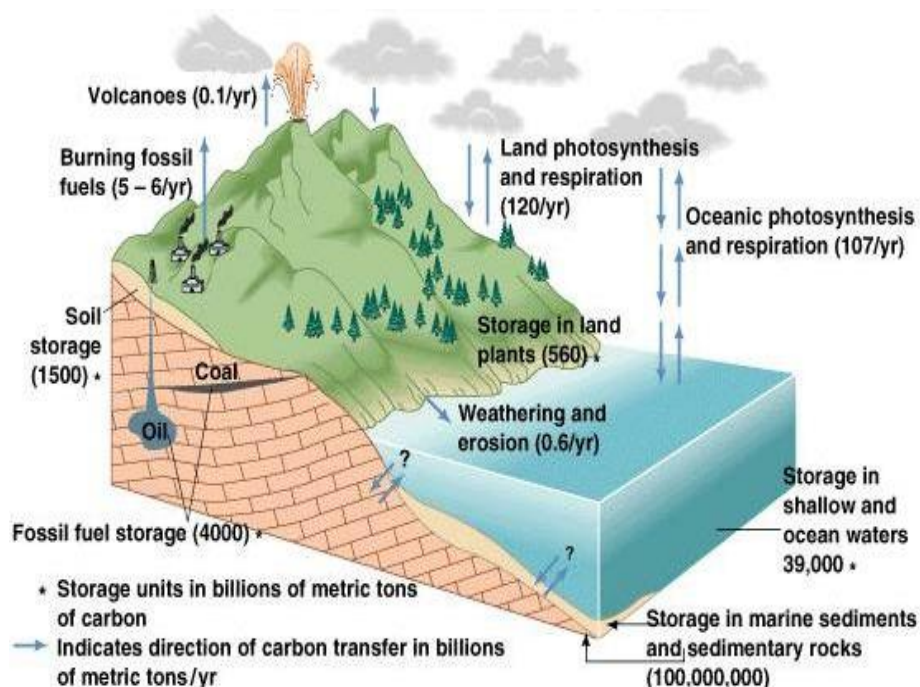


Figura 4. Importancia del ciclo del Carbono en el suelo (FAO, 2022).

7. Microorganismos asociados al suelo. Abbott y Murphy (2017) reportaron la importancia de la vida microbiológica del suelo en su recuperación, evidenciaron el aumento de la población microbiana por efecto de los años de descanso, de la misma manera notaron la mayor abundancia microbiana en suelos con cobertura vegetal, interviniendo en los procesos que dan origen a la fertilidad del suelo. El papel principal de los microorganismos del suelo es proveer servicios ecosistémicos, como la purificación de agua, el aumento de la fertilidad del suelo, la nitrificación, descomposición y degradación, ciclo de nutrientes especialmente N, S y P. Lo anterior debido a que un gramo de suelo contiene 105-108 bacterias, 106-107 actinomicetos y 105-106 hongos UFC, los cuales liberan los nutrientes en los suelos (Hidalgo, Álvarez-Méndez, Navarro-Fernández, Cara-García y Pérez-Ramos, 2018). Un descenso del pH por adición de nitrógeno podría afectar en la lixiviación de micronutrientes, carbón orgánico; y la reducción de la biomasa microbiana (Herrera, 2019). Los microorganismos son relevantes en los ciclos biogeoquímicos por la descomposición de la MO, intervienen en los ciclos del N, la fijación del N, nitrificación, desnitrificación, en el ciclo del P, los microorganismos contribuyen a su solubilización, donde están involucrados diversidad de bacterias solubilizadoras de fósforo y hongos asociados a las raíces de las plantas cultivadas (García-Velásquez, 2017).

La mayor abundancia de hongos se encuentra en las capas superficiales del suelo, donde el microclima, ambiente y disponibilidad de recursos nutricionales son favorables para su desarrollo y crecimiento (Bertolini, Montaña, Chimal-Sánchez, Varela-Fregoso, Gómez-Ruiz y Martínez-Vázquez, 2018). Decrecen con la profundidad y condiciones desfavorables del suelo, tanto de origen natural como antropógeno. Un grupo son los hongos micorrízicos arbusculares

(HMA) que producen y liberan al suelo una glicoproteína cementante de los agregados estables al agua denominada glomalina, la cual pasa a formar parte de la MO edáfica, por lo que ha sido asociada al mantenimiento de la estructura del suelo, así como al secuestro de carbono (Mañana et al. 2021).

Las bacterias del suelo son responsables de la inmovilización, mineralización de N del suelo y de los procesos que controlan el suministro de amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) para las plantas. La mineralización ocurre en dos etapas, en la primera, los microorganismos transforman los componentes de N orgánico en NH_4^+ ; y la segunda, en la que se sintetiza nitrato (NO_3^-) a partir del amonio. Específicamente, los organismos autótrofos convierten el N orgánico en NH_4^+ a través de la amonificación; mientras que los organismos heterótrofos transforman el NH_4^+ a NO_3^- , en un proceso denominado nitrificación [(1) $\text{NH}_4^+ + \text{O}_2 = \text{NO}_2^- + 4\text{H}^+$; (2) $\text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} = \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+$] [(1) $\text{NH}_4^+ + \text{O}_2 = \text{NO}_2^- + 4\text{H}^+$, (2) $\text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} = \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+$] (He y Zhang, 2014).

COMENTARIOS FINALES

El monitoreo y registro del estado de la fertilidad del suelo es de suma importancia en todo sistema agrícola, ya que los rendimientos dependen en gran medida de la capacidad del suelo para proveer a la planta todos los nutrientes necesarios para su desarrollo y producción.

Aunque los estudios de fertilidad de suelos son poco usuales, tardados y costosos en la agricultura tradicional se recomienda realizarlos previo al establecimiento de cultivos agrícolas, puesto que el desconocimiento puede provocar graves problemas en la producción, rendimiento y degradación de los suelos.

El contar con información disponible permitirá a los productores, científicos y responsables de la

producción agropecuaria, implementar estrategias de mejora y manejo de los suelos agrícolas a partir del conocimiento de sus propiedades físicas, químicas y biológicas para contribuir en la autosuficiencia, seguridad y soberanía alimentaria de los agricultores.

REFERENCIAS

- Abbasi, M. K. and Khizar, A. (2012). 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*, 39, 123-132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.027>
- Abbott, L.K. and Murphy, D. V. (2017). What is soil biological fertility? *In: Soil Biological Fertility A Key to Sustainable Land Use in Agriculture*. Dordrecht, The Netherlands. Springer. pp. 1-15.
- Amores, M. M. (2020). Efecto de prácticas de manejo del suelo y sus interacciones en la dinámica del carbono orgánico del suelo: Revisión de Literatura. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/6738>
- Antil, R. S., Bar-Tal, A., Fine, P. and Hadas, A. (2011). Predicting nitrogen and carbon mineralization of composted manure and sewage sludge in soil. *Compost Science & Utilization* 19, 33-43. DOI: <https://doi.org/10.1080/1065657X.2011.10736974>
- Barragán, V. J. (2021). Evaluación de tres tecnologías de preparación del suelo con tres densidades de siembra del cultivo de frejol (*Phaseolus vulgaris* L.). Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrícolas, Ingeniería en Agronomía, Quito, Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/2500/0/23266>
- Barreuzeta-Unda, S., Cervantes-Alava, A., Ullauri-Espinoza, M., Barrera-León, J. y Conday-Gorotiza, A. (2020). Evaluación del método de ignición para determinar materia orgánica en suelos de la provincia el Oro-Ecuador. *FAVE Ciencias Agrarias* 19 (2). http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=SI666-77192020000200025&lng=es&tlng=es
- Begum, M., Bordoloi, B.C., Singha, D.D. y Ojha, N.J. (2018). Papel del extracto de algas marinas en el crecimiento, rendimiento y calidad de algunos cultivos agrícolas: una revisión. *Revisiones agrícolas* 39(4): 321-326. DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2020.007>
- Bertolini, V., Montañó, N. M., Chimal-Sánchez, E., Varela-Fregoso, L., Gómez Ruiz, J., y Martínez-Vázquez, J. M. (2018). Abundancia y riqueza de hongos micorrizógenos arbusculares en cafetales de Soconusco, Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical*, 66(1), 91-105. DOI: <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i1.27946>
- Bosch-Serra, À. D.; Mateo-Marín, N., Molina, M. G., Poch, R. M. y Boixadera-Bosch, M. M. (2022). Cambios en la porosidad del suelo asociados a la fertilización con purín porcino. ITEA-Información Técnica Económica Agraria, 2022, vol. 118, núm. 4, p. 518-529. DOI: <https://doi.org/10.12706/itea.2022.008>
- Boutchuen, A., Zimmerman, D., Aich, N., Mohammad, M. A., Arabshahi, A. and Palchoudhury, S. (2019). Increased plant growth with hematite nanoparticle fertilizer drop and determining nanoparticle uptake in plants using Multimodal Approach. Hindawi, *Journal of Nanomaterials*, 2019, 11. Article ID 6890572. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/6890572>
- Bünemann, E., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T., Mäder, P., Pulleman, M., Sukke, W., Groenigen, J., y Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. DOI:

- <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Calderón-Medina, C. L., Bautista-Mantilla, G. P. y Rojas-González, S. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. *Orinoquia*, 22(2), 141-157. DOI: <https://doi.org/10.22579/20112629.524>
- Calva, C. y Espinosa, J. (2017). Efecto de la aplicación de cuatro materiales de enclado en control de la acidez de un suelo de Loreto, Orellana. *Siembra*, 4(1), 110-120. DOI: <https://doi.org/10.29166/siembra.v4i1.505>
- Ciapparelli, I. C., Fabrizio de Iorio, A. R., Santos, C. N. y García, A. R. (2019). Efecto de elevadas dosis de estiércol bovino sobre el grado de saturación de fósforo de un suelo en Pampa Ondulada. En: V Reunión Argentina de Geoquímica de la Superficie (RAGSU). La Plata, Buenos Aires, Argentina. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/77316>
- Cid-Lazo, G., López-Seijas, T., Herrera-Puebla, J. y González-Robaina, F. (2021). Variación de la densidad aparente para diferentes contenidos de agua en suelos cubanos. *Revista de Ingeniería Agrícola*, 11(2). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586266250001>
- Colín Velázquez, V. H. (2018). Actividad respiratoria y enzimáticas en un suelo de cultivo de albahaca (*Ocimum basilicum*) enmendado con lombricomposta. Universidad Autónoma del Estado de México. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/98958>
- Colorado, R. R. H., Alvarado, A. L. y Romero, R. M. (2012). Acumulación de cobre en plantas silvestres de zonas agrícolas contaminadas con el metal. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 28(1-2). <https://revistas.ucr.ac.cr./index.php/cienciaytecnologia/oai>
- Cotler, H., Corona, J. A. y Galeana-Pizaña, J. M. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera aproximación. *Investigaciones geográficas*, 101, e59976. Epub 02 de octubre de 2020. DOI: <https://doi.org/10.14350/rig.59976>
- Dabadie, M., Pérez, C., Arturi, M., Goya, J. y Sandoval, M. (2018). Calibración del método de pérdida de peso por ignición para la estimación del carbono orgánico en Inceptisoles del NE de Entre Ríos. *Revista De La Facultad De Agronomía*, 117(1), 157-162. <https://revistas.unlp.edu.ar/revagro/articulo/view/7330>
- Díaz-García, P. (2019). Evaluación de la fertilidad química y bioquímica del suelo con diferentes estrategias de riego deficitario en olivo y almendro. Universidad de Sevilla.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). *Propiedades químicas de los suelos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/es/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). *Propiedades químicas de los suelos*. Roma, Italia. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/es/>
- García-Velázquez, L. y Gallardo, A. (2017). El ciclo global del nitrógeno. Una visión para el ecólogo terrestre. *Ecosistemas*, 26(1), 4-6. DOI: <https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-1.02>
- Gonzales-Torrico, E. M., Pacasa-Quisbert, F. y Hurtado-Barrero, J. (2022). Sistemas de producción biointensiva y tradicional sobre parámetros agronómicos de hortalizas. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 10(1), 57-65. DOI: <https://doi.org/10.36610/j.jsab.2022.100100057>
- Guzmán Duchén, D. y Montero Torres, J. (2021). Interacción de bacterias y plantas en la fijación del nitrógeno. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 8(2), 87-101. DOI: <https://doi.org/10.53287/uyxf4027gf99e>

- Herrera-Díaz, A. M. (2019). Composición y abundancia de invertebrados y microorganismos indicadores del proceso de descomposición de materia orgánica del suelo, en relación a prácticas agronómicas en ocho fincas con cultivos de palma de aceite en la zona Oriente de Colombia. Tesis de grado. Universidad La Salle, Colombia. <https://ciencia.lasalle.edu.co/biologia/69/>
- He, Z. and H. Zhang. 2014.(Eds). *Applied manure and nutrient chemistry for sustainable agriculture and environment*. Springer, New York, USA. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8807-6>
- Hidalgo, M. D., Álvarez-Méndez, A., Navarro-Fernández, C. M., Cara-García, J. S. y Pérez-Ramos, I. M. (2018). Impacto del clima sobre la morfología radicular y su interacción con la microbiota del suelo en ecosistemas de dehesas: una aproximación multifuncional. Producción CSIC. II Simposio del Grupo de Trabajo "Interacciones Planta-Suelo" Poster PI-2, pág. 15. <http://hdl.handle.net/10261/171611>
- Hocking, B., Tyerman, S. D.; Burton, R. A. and Gilliam, M. (2016). Fruit calcium: transport and physiology. *Frontiers Plant Science* 7, 569. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00569>
- Hueso-González, P., Muñoz-Rojas, M. and Martínez-Murillo, J. F. (2018). The role of organic amendments in drylands restoration. Current Opinion In: *Environmental Science and Health* 5:1-6. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.301
- Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura (INTAGRI). (2017). Fijación de potasio en el suelo. Serie Suelos Núm. 31. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 3 p. <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/sintomas-visuales-de-deficiencia-de-fosforo-en-los-cultivos>
- Lima-Molina, N., Aguirre-Terrazas, L. y Flores-Mariazza, E. (2020). Strategies to improve high andean rangelands: the role of clover and phosphorous fertilization. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 31(2). DOI: <https://doi.org//dx.doi.org/10.15381/rive.p.v31i1.17840>
- López, A., Cacoub, P., Macdougall, I. C. and Peyrin-Biroulet, L. (2016). Iron deficiency anaemia. *The Lancet* 387(10021), 907–916. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60865-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60865-0)
- López-Báez, W., Reynoso-Santos, R., López-Martínez, J., Villar-Sánchez, B., Camas-Gómez, R. y García-Santiago, J. (2019). Caracterización físico-química de suelos cultivados con maíz en Villaflores, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10: 897-910. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1764>
- López-Choque, M. A. (2020). Validación del método kjeldahl para la determinación de nitrógeno total en suelos agrícolas del departamento de La Paz (Doctoral dissertation). <https://repositorio.umsa.bo/browse?type=author>
- Maciel-Torres, S., P., Figueroa-Viramontes, U., Jacobo-Salcedo, M. D. R.; Pedroza-Sandoval, A., Trejo-Calzada, R. and Encerrado-Alva, R. C. (2017). Micronutrients in castor-oil plants (*Ricinus communis* L.) growing in soil fertilized with biosolids. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 16(2), 13-22. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchza.2017.10.007>
- Maldonado-Torres, R., Álvarez-Sánchez, M. E., Abarca-Cervantes, A. D. y Almaguer-Vargas, G. (2020). Cambios celulares en hojas de aguacate con deficiencias de calcio. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(1), 13-23. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.2209>
- Martínez-Gamiño, M. A., Osuna-Ceja, E. S. y Espinosa-Ramírez, M. (2019). Impacto acumulado de la agricultura de conservación en propiedades del suelo y rendimiento de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10(4),

- 765-778. Epub 22 de mayo de 2020. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1640>
- Martínez-Rodríguez, O., Can-Chulim, Á., Ortega-Escobar, H., Bojórquez-Serrano, J., Cruz-Crespo, E., García-Paredes, J. y Madueño-Molina, A. (2021). Fertilidad e índice de calidad del suelo de la cuenca del río San Pedro en Nayarit. *Terra Latinoamericana*, 39, e766. Epub 17 de junio de 2021. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.766>
- Mañana, B., Covacevich, F., Sainz R., Barbieri, A. y Giselle-Commatteo, J. A. (2021). Encalado en suelos agrícolas acidificados de la región Pampeana: efecto sobre actividad de hongos micorrízicos. *Ciencia del Suelo*, 39(1). http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=SI85020672021000100020&lng=es&tlng=es.
- Melendres, A. I., Zermeño, A., Ramírez, H., Cárdenas, J. O. y Cadena, M. (2017). Eficiencia del uso del agua de un viñedo y su relación con porosidad del suelo. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(5), 57-69. DOI: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-04>
- Mendoza, L. G., Vera, V., Giler, J. M. y Simbaña, K. (2022). Características fisicoquímicas de suelos de uso agrícola y forestal. Caso: San Pablo de Tarugo, Chone-Ecuador. *Revista Científica Ciencias Naturales y Ambientales*, 16(1). <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/37932>
- Monsalve-C., O.I., Gutiérrez, D., J.S. y Cardona, W. A. 2017. Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 200–209. DOI: <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5663>
- Muñoz-Rojas, M., Delgado-Baquerizo, M., and Lucas-Borja, M. E. (2021). Soil biodiversity and organic carbon are essential to reverse desertification. *Ecosistemas*, 30 (3), 2238. DOI: <https://doi.org/10.7818/ECOS.2238>
- Naranjo, G., García-Ocampo, A. y Quiceno, J. (2018). Efectos de varias dosis de magnesio aplicadas al suelo sobre el crecimiento de plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.) *Cacaotero Colombiano*, 14. p. 26-39. DOI: <https://doi.org/hdl.handle.net/20.500.12324/21924>
- Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT-2000). *Metodologías de análisis de suelo en México*. Segunda sección. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280.pdf>
- Nuñez-Peñaloza, J. L., Cristóbal-Acevedo, D., Hernández-Acosta, E. y Villanueva-Morales, A. (2022). Efecto de tres sistemas de producción sobre el estado de la fertilidad física del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(72), 55-81. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i72.1279>
- Orellana-Salas, J. A. y Lalvay-Portilla, T. C. (2018). Uso e importancia de los recursos naturales y su incidencia en el desarrollo turístico. Caso Cantón Chilla, El Oro, Ecuador. *Revista interamericana de ambiente y turismo*, 14(1), 65-79. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-235X2018000100065>
- Paramo, G. E., Rodríguez, H. S. y Siachoque, R. F. (2022). Incorporación de la evaluación de servicios ecosistémicos (Captura de carbono y aporte potencial de nitrógeno) como parte de la planificación del uso eficiente del suelo. *Suelos Ecuatoriales*, 52(1y2), 51-70. DOI: [https://doi.org/10.47864/SE\(52\)2022p51-70_156](https://doi.org/10.47864/SE(52)2022p51-70_156)
- Peña, R. y Cruz, A. (2020). Aplicación de bioestimulantes con microelementos en el cultivo de maracuyá (*Passiflora edulis* F.): Rendimiento, calidad y rentabilidad económica. *Manglar*, 17(1), 39-46. DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2020.07>
- Pérez-Mesa, A. (2018). Verificación y estandarización de métodos fisicoquímicos para la determinación de nitrógeno total,

- nitrógeno amoniacal y sulfuros en matrices de aguas crudas y residuales. Universidad de Antioquia. 18 p.
<https://hdl.handle.net/10495/13153>
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S. and Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma* 314: 122-137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Ramos-Oseguera, C. A., Castro-Ramírez, A. E., León-Martínez, N. S., Álvarez-Solís, J. D. y Huerta-Lwanga, E. (2019). Lombricomposta para recuperar la fertilidad de suelo franco arenoso y el rendimiento de cacahuete (*Arachis hypogaea* L.). *Terra Latinoamericana*, 37(1), 45-55. DOI: <https://doi.org/10.28940/tl.v37i1.331>
- Rivera, S. A., Ferreyra, R., Robledo, P., Selles, G., Arpaia, M. L., Saavedra, J. and Defilippi, B.G. (2017). Identification of preharvest factors determining postharvest ripening behaviors in 'Hass' avocado under long term storage. *Scientia Horticulturae*, 216:29-37. DOI:10.1016/S0140-6736(15)60865-0
- Rosales-Neri, Y. (2019). *Densidad aparente y cuantificación de carbono y nitrógeno en suelos con caña de azúcar en Morelos y Puebla, México*. (Master's thesis) Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
<http://hdl.handle.net/10521/3912>
- Ruscitti, M. (2017). *La micorrización modifica la respuesta de las plantas de pimiento en presencia de cobre en el suelo*. (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata). DOI: <https://doi.org/10.35537/10915/60324>
- Sabahi, H., Veisi, H., Soufizadeh, S. y Asilan, K. S. (2010). Effect of fertilization systems on soil microbial biomass and mineral nitrogen during Canola (*Brassica napus* L.) development stages. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 41, 1665-1673: DOI: 10.1080/00103624.2010.489132
- Sadeghian-Khalajabadi, S. y Arias-Suarez, E. (2018). Lixiviación del potasio en suelos de la zona cafetera y su relación con la textura. Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial. Vol. 16. No. 1. DOI: <http://dx.doi.org/10.18684/bsaa.v16n1.632>
- Salazar-Calvo, C., González-Venegas, J. P., Corrales-Valverde, D., Lacayo-Vega, J., Carrillo-Montoya, K. y Montero-González, H. (2020). Comparación de dos métodos para la determinación de la densidad aparente del suelo. *Alcances Tecnológicos*, 13(1), 5 - 12. DOI: <https://doi.org/10.35486/at.v13i1.164>
- Salgado-Pacheco, T., Myazin-Georgievich, N., Kozhokina-Nikolaevna, A. y Brekhov-Timofevich, P. (2021). El efecto de los microelementos sobre la germinación de semillas y el rendimiento de la masa verde de trigo de invierno en el periodo vegetativo. *Revista Prisma Tecnológico*. 12(1), 54-59. DOI: <https://doi.org/10.33412/pri.v12.1.2846>
- Sánchez, J. E.; Harwood, R. R.; Willson, T. C.; Kizilkaya, K.; Smeenk, J.; Parker, E.; Paul, E. A.; Knezek, B. D. and Robertson, G. P. (2004). Managing soil carbon and nitrogen for productivity and environmental quality. *Agronomy Journal*, 96(3):769-775. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0769>
- Schoonover, J., y Crim, J. (2015). An Introduction to Soil Concepts and the Role of Soils in Watershed Management. *Journal of Contemporary Water Research & Education* 15(1): 21-17. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1936-704X.2015.03186.x>
- Taiz, L., Zeiger, I., Møller, M. and Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development*. 6 ed. Sunderland (USA): Sinauer Associates Inc. 761 p. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20173165866>
- Timmis, K., Ramos, J. L. (2021). The soil crisis: the need to treat as a global health problem and the pivotal role of microbes in prophylaxis and therapy. *Microbial Biotechnology* 4(3):769-797. DOI: 10.1111/1751-7915.13771
- Urriola S. L. (2020). ¿Por qué estudiar las propiedades físicas del suelo? *Revista Semilla*

- del Este, *I(1)*, 23-26.
https://revistas.up.ac.pa/index.php/semilla_este/article/view/2020
- United States Department of Agriculture. (USDA). (1999). Natural resources conservation service. Plants Database. <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/ProcedureForRibeyeApproval2003.pdf>
- Valdivia, J. E. G., Acebedo, J., Armas, C., Custodio, M., García, M., Gonzales, A. y Vásquez, M. (2018). Fitorremediación de un suelo con exceso de cobre utilizando cuatro especies vegetales; “girasol, alfalfa, geranio e higuera”. *Searching-science*, *I(1)*, 12-12. <https://revista.uct.edu.pe/index.php/science/article/view/132/409>
- Vega-Blancas, V. J., Fernández-Reynoso, D. S., Macedo-Cruz, A., Ríos-Berber, J. D. y Ruiz-Bello, A. (2022). Análisis de la fertilidad del suelo mediante la validación e interpolación Kriging de sus variables. *Terra Latinoamericana*, *40*, 1-12. e1573. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1573>
- Valera, Á. R. V., Rodríguez, E. R. A y Martínez, A. (2019). Obtención de clases de fertilidad de suelos con técnicas geoestadísticas y lógica difusa en campos experimentales. Memorias arbitradas de la X Jornadas de Investigación, I de Producción y VII de Socialización del Conocimiento. Universidad Rómulo Gallegos. San Juan de los Morros, Venezuela. https://www.academia.edu/download/58522267/36_Valera_Arias_Martinez_Logica_Difusa_y_Geoestadistica_2019.pdf
- Villalba-Martínez, C., Merino-García, A. y Etchevers-Barra, J. (2020). Diagnóstico de la fertilidad química de suelos en sistemas agrarios y forestales de la región Oriental de Paraguay. *Investigación Agraria*, *22(2)*, 92-99. DOI: <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2020.diciembre.2202658>
- Willey, N. (2016). *Environmental plant physiology*. 1st ed. New York (USA): Garland Science. 320 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781317206231>