Secuestro de carbono en suelos de la región cafetalera de Veracruz, México, con enfoque etnoedafológico

Carbon sequestration in soils of the coffee-growing region of Veracruz, Mexico, from an ethnoedaphological approach

Eva Aurora Bautista-Calderon[1], Lenom Cajuste-Bontemps[2], Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena[3*], Carlos Alberto Ortiz-Solorio[2], Enrique Ojeda-Trejo[2], Juan Carlos Montoya-Jiménez[4]

[1]Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta y Atmósfera, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Km. 6.5 margen derecha, canal Sacramento, CP. 35150, Gómez Palacio, Durango, México.
[2]Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco, km 36.5, CP. 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.
[3]Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Calle Francisco Villa S/N, ex-Hacienda el Canadá. General Escobedo, Nuevo León, México.
[4]Tecnológico Nacional de México-TES Valle de Bravo, División de Ingeniería Forestal. Carretera Federal Monumento-Valle de Bravo, km 30. Ejido San Antonio de la Laguna. Valle de Bravo. Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: edgar.gutierrezcs@uanl.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 08 de mayo 2025
Aceptado: 03 de mayo 2026

RESUMEN. La etnoedafología integra el conocimiento local de los agricultores con la ciencia del suelo para comprender la diversidad edáfica y sus funciones ecosistémicas. Esta investigación evaluó la eficacia del enfoque etnoedafológico para caracterizar suelos y cuantificar el carbono orgánico del suelo (COS) en sistemas agroforestales de café del municipio de Huatusco, Veracruz, México. Mediante recorridos de campo, entrevistas y cartografía participativa se identificaron seis clases de tierra locales: Negra, Barrial amarillo, Barrial colorado, Cañada, Tepocha y Polvillo. Dichas clases se contrastaron con la clasificación taxonómica, correspondiendo principalmente a Phaeozems, Acrisols, Leptosols y Cambisols. El COS se midió en 18 sitios de muestreo, distribuidos proporcionalmente a la superficie de cada clase de tierra, a profundidades de 0-30 y 30-60 cm, además de perfiles pedológicos representativos. Los resultados mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en la conservación del COS entre clases de tierra y profundidades. La Tierra Negra presentó el mayor contenido promedio de COS (123.35 ± 53.35 Mg·ha^{-1}), seguida de Barrial colorado y Barrial amarillo, mientras que Tepocha registró los valores más bajos. A escala de paisaje, la Tierra Negra concentró el mayor almacenamiento total de COS. La distribución vertical evidenció mayores reservas de COS en el estrato subsuperficial (30-60 cm) respecto al superficial, resaltando su papel como reservorio estable. En conjunto, los resultados confirman que las clases de tierra definidas por los productores reflejan diferencias edáficas reales y funcionales, y que el enfoque etnoedafológico fortalece la estratificación del muestreo y la interpretación del carbono en suelos agrícolas sostenibles actuales.
Palabras clave: Etnoedafología, conocimiento local, carbono orgánico del suelo, sistemas agroforestales de café.

ABSTRACT. Ethnoedaphology integrates farmers' local knowledge with soil science to understand soil diversity and its ecosystem functions. This research evaluated the effectiveness of the ethnoedaphological approach for characterizing soils and quantifying soil organic carbon (SOC) in coffee agroforestry systems in the municipality of Huatusco, Veracruz, Mexico. Through field surveys, interviews, and participatory mapping, six local soil classes were identified: Negra, Barrial amarillo, Barrial colorado, Cañada, Tepocha, and Polvillo. These classes were compared with the taxonomic classification, corresponding mainly to Phaeozems, Acrisols, Leptosols, and Cambisols. SOC was measured at 18 sampling sites, distributed proportionally to the area of each soil class, at depths of 0–30 and 30–60 cm, in addition to representative soil profiles. The results showed significant differences ($p < 0.05$) in SOC conservation among soil classes and depths. Tierra Negra had the highest average SOC content (123.35 ± 53.35 Mg·ha^{-1}), followed by Barrial Colorado and Barrial Amarillo, while Tepocha recorded the lowest values. At the landscape scale, Tierra Negra concentrated the greatest total SOC storage. The vertical distribution showed greater SOC reserves in the subsurface layer (30-60 cm) compared to the surface layer, highlighting its role as a stable reservoir. Overall, the results confirm that the soil classes defined by the producers reflect real and functional soil differences, and that the ethnoedaphological approach strengthens the stratification of sampling and the interpretation of carbon in current sustainable agricultural soils.
Keywords: Ethnoedaphology, local knowledge, soil organic carbon, coffee agroforestry systems.

Como citar: Bautista-Calderon EA, Cajuste-Bontemps L, Gutiérrez-Castorena EV, Ortiz-Solorio CA, Ojeda-Trejo E, Montoya-Jiménez JC (2026) Secuestro de carbono en suelos de la región cafetalera de Veracruz, México, desde un enfoque etnoedafológico. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 13(2): e4339. DOI: 10.19136/era.a13n2.4339.

INTRODUCCIÓN

La comprensión del suelo como un sistema complejo, producto de la interacción entre elementos naturales y sociales, ha adquirido importancia en el escenario contemporáneo de cambio climático y degradación de tierras. Este conocimiento es fundamental para la toma de decisiones sobre su gestión y la búsqueda de estrategias sostenibles para la administración y gestión del recurso natural (Turner 2021). En este contexto, se propone la Etnoedafología como una perspectiva que amalgama el saber científico con el conocimiento tradicional y local generado por las comunidades rurales acerca del suelo o la tierra, su gestión y su función en los sistemas productivos (Barrera-Bassols y Zinck 2003). Esta perspectiva reconoce que los productores agrícolas han adquirido a lo largo del tiempo un conocimiento empírico detallado de los suelos que gestionan. Este conocimiento se construye a partir de la observación directa, la experiencia práctica, la utilización constante del recurso y la transmisión intergeneracional (Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena 2001). En este sentido, la etnoedafología se define como la disciplina que examina la percepción, clasificación, utilización y gestión de los suelos por parte de las sociedades humanas, teniendo en cuenta factores como la cosmovisión, el lenguaje, las prácticas agrícolas y las experiencias acumuladas a lo largo del tiempo (Barrera-Bassols y Toledo 2005).

Desde esta perspectiva, Ortiz-Solorio *et al*. (1991) sugieren un método que comienza con la forma en la que los campesinos clasifican las tierras, junto con los productores de la región. Luego, se añade una clasificación formal basada en sistemas internacionales de clasificación de suelos (Soil Survey Staff 2014, IUSS Working Group WRB 2015). Por lo tanto, la etnoedafología se establece como un canal de comunicación entre dos modalidades de pensamiento e interpretación del suelo, al fusionar el saber tradicional con el conocimiento científico, lo que facilita una comprensión más exhaustiva del recurso edáfico (Ortiz-Solorio 1993). En contraposición a la edafología tradicional, que se fundamenta principalmente en criterios físico-químicos y taxonómicos, la etnoedafología reconoce que los agricultores desarrollan sistemas propios de clasificación del suelo, fundamentados en atributos perceptibles como el color, la textura, la fertilidad percibida, la humedad, la productividad y la respuesta de los cultivos Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena 2001).

En México, el café es uno de los cultivos agroforestales tropicales más importantes para el sustento de millares de familias (Escamilla-Prado *et al*. 2015). La cafeticultura mexicana está distribuida en aproximadamente 60 regiones productoras, de las cuales cerca del 60 % están en manos de familias campesinas e indígenas que habitan principalmente en los estados de Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla y Guerrero (Nájera 2002). Estos sistemas no solo representan un recurso económico fundamental, sino que también proporcionan múltiples productos y servicios ecosistémicos. Entre estos servicios destaca el secuestro y almacenamiento de carbono, que contribuye a la mitigación de los efectos del cambio climático y a la sostenibilidad de los agroecosistemas cafetaleros. En el sur del país, los sistemas agroforestales de café tienen el potencial de almacenar en el suelo alrededor de 126 Mg de C ha^{-1} a 159.1 Mg de C ha^{-1} (Masuhara *et al*. 2015, Zaro *et al*. 2020, Hernández *et al*. 2021, Valdés *et al*. 2022, Mazumder *et al*. 2025, Oliveira *et al*. 2025). Sin embargo, la estimación precisa y comparable de los almacenes de carbono en el suelo enfrenta diversas limitaciones metodológicas (Batjes 1996). El potencial de secuestro de carbono en estos suelos no puede

comprenderse plenamente sin considerar el conocimiento local que los productores poseen sobre la calidad, productividad y comportamiento de sus tierras, lo cual puede ser integrado mediante enfoques como la etnoedafología para orientar estrategias de manejo que maximicen tanto los beneficios productivos como la contribución al secuestro de carbono. Aunque la mayoría de las investigaciones etnoedafológicas en México han sido realizadas en áreas predominantemente agrícolas (Hernández-Andrade *et al*. 2018, Morales-Espinoza *et al*. 2021, Pérez-Rodríguez 2023), algunas investigaciones han expandido su aplicación a contextos con actividad agrícola reducida o nula (Villafuerte-González *et al*. 2021) y a sistemas cafetaleros (Licona-Vargas *et al*. 2006, Aguilar-Orea *et al*. 2019). Existen escasas investigaciones que incorporan explícitamente la etnoedafología en la evaluación del secuestro de carbono en suelos cafetaleros. Esto evidencia la necesidad de profundizar en este enfoque como una herramienta para fortalecer la gestión sostenible del suelo y la mitigación del cambio climático en la cafeticultura mexicana. El objetivo de este estudio fue cuantificar el contenido y almacenamiento de carbono orgánico del suelo en sistemas cafetaleros de los ejidos Sabanas y Cotecontla del municipio de Huatusco, Veracruz, mediante la integración del enfoque etnoedafológico en la caracterización y clasificación local de los suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona de investigación se ubica en la región montañosa del municipio de Huatusco, Veracruz (Bautista *et al*. 2018). La región cafetalera de Huatusco se clasifica en tres áreas diferenciadas en función de su aptitud para la cafeticultura: la región alta, la región media-alta y la región baja. Los territorios de alta y media-alta se distinguen por las condiciones climáticas y topográficas favorables que facilitan la producción de café de alta calidad. En efecto, la región baja no cuenta con estas condiciones, lo que conduce a una disminución en los rendimientos productivos. Conforme a la medida de la superficie ejidal, se seleccionó la región media-alta como el área de estudio, en la que se ubican los ejidos Sabanas y Cotecontla. El ejido Sabanas posee una superficie de 107 ha y se ubica en las coordenadas 19°07′40.71″ LN y 96°53′54.87″ LO. Por otro lado, el ejido Cotecontla ostenta una superficie de 277 ha, situada en las coordenadas 19°07′05.54″ LN y 96°53′32.64″ LO, tal como se ilustra en la Figura 1.

La zona de investigación se distingue por presentar como material parental una roca ígnea extrusiva básica del periodo cuaternario. Esta se ubica en la región hidrológica del Papaloapan, donde predominan las escorrentías perennes e intermitentes, tanto perennes como intermitentes. El relieve está conformado principalmente por lomeríos basálticos, con variaciones en profundidad y textura del suelo. La temperatura media anual fluctúa entre 16 y 26 °C, mientras que la precipitación media anual oscila entre 1 100 y 1 600 mm (INEGI 2008). La vegetación predominante es la selva tropical de niebla montañosa, con una presencia notable de plantaciones de café establecidas bajo sistemas agroforestales.

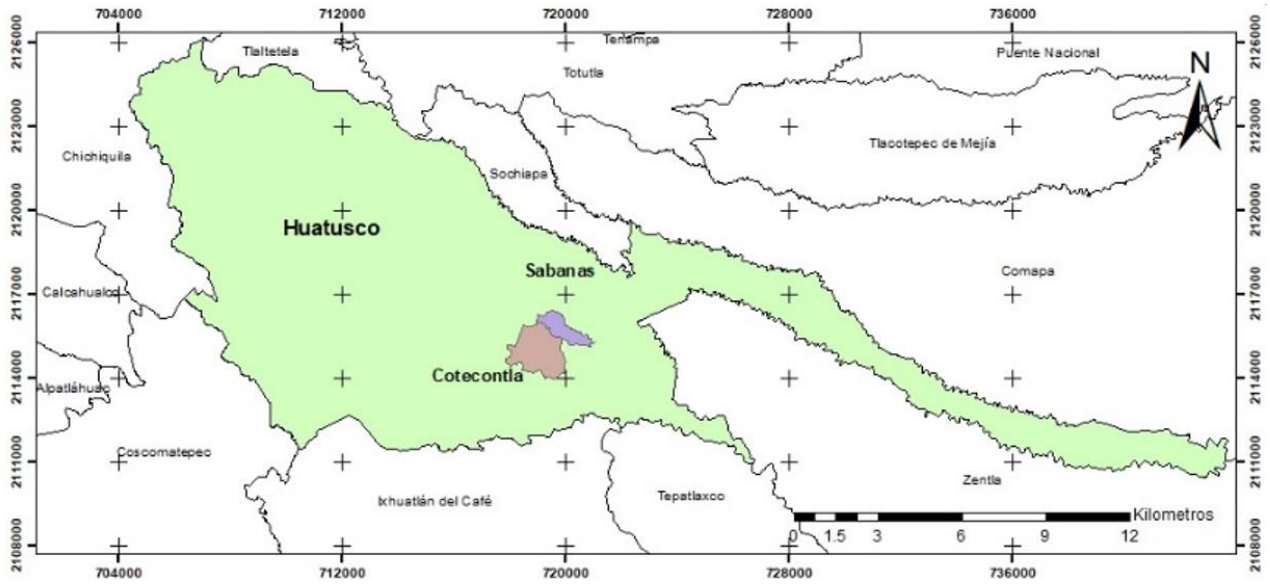


Figura 1. Zona de estudio que comprende los Ejidos de Sabanas y Cotecontla en el municipio de Huatusco, Veracruz.

Enfoque Etnoedafológico

La cartografía etnoedafológica inicial se desarrolló de acuerdo con la metodología propuesta por Ortiz-Solorio *et al*. (1990), la cual se fundamenta en el saber campesino para el reconocimiento y la clasificación de las tierras. Debido a la falta de un plano parcelario, se requirió una adaptación metodológica mediante el uso de cartografía base. Esta se empleó para el análisis del terreno y las geoformas, utilizando criterios de clasificación de tierras basados en técnicas de fotointerpretación. A continuación, se dividió el área en Unidades de Fotointerpretación (UFI) (Licona-Vargas *et al*. 1993), las cuales se definen por la homogeneidad en las texturas del suelo y las formas del terreno. Para la delimitación de las UFI en cada ejido, se empleó información proveniente de un modelo digital de elevación (DEM) LiDAR de alta resolución (5 m) (INEGI 2013), junto con imágenes de Google Earth y ESRI (2015), efectuando el análisis a una escala operativa de 1:20 000 (Quattrochi-Dale y Goodchild-Michael 1997).

Las entrevistas a los productores se realizaron de manera simultánea a la elaboración de la cartografía base. En este sentido, se emprendió la búsqueda y establecimiento de contactos en la región cafetalera de Huatusco, mediante la Dirección de Desarrollo Económico y la Coordinación de Fomento Agropecuario. En este contexto, se solicitó la autorización y el respaldo de las autoridades locales para facilitar la comunicación y el acercamiento con los ejidatarios asociados a la producción de café bajo sistemas agroforestales.

Durante el trabajo de campo se identificaron y georreferenciaron las diferentes clases de tierra identificadas por los productores locales. Se utilizó la cartografía base como instrumento para la planificación de los recorridos de campo y para la identificación de las principales vías de comunicación, incluyendo carreteras, caminos pavimentados y terracerías. Con el propósito de optimizar las actividades de campo, se dividió el perímetro que abarca ambos ejidos en tres zonas: el ejido Sabanas se designó como la zona uno, mientras que las zonas dos y tres se ubicaron en el ejido Cotecen. A continuación, se llevaron a cabo rastreos georreferenciados utilizando dispositivos

GPS y las aplicaciones GPS Status, GPX Viewer PRO y Toolsmaps, con el propósito de localizar las parcelas destinadas a la producción de café.

Una vez que las parcelas se identificaron, se llevaron a cabo entrevistas semiestructuradas con los productores propietarios de las mismas. Estas entrevistas incluyeron las siguientes cuestiones: i) ¿Cómo se denominan dichas tierras?, iii) ¿Cómo se identifican?, iv) ¿Por qué son distintas entre sí?, v) ¿Cuáles son las características distintivas de cada tipo de tierra?, y vi) ¿Dónde se ubican los límites o linderos entre ellas? Luego, se establecieron sitios representativos para cada clase de tierra identificada. En dichos lugares se realizó la descripción morfológica del suelo y la apertura de perfiles pedológicos. A partir de estos procedimientos se obtuvieron muestras de suelo alteradas por horizontes de diagnóstico, las cuales se trasladaron al laboratorio para su análisis.

La ejecución de los análisis físicos comprendió la determinación de la textura por medio del método de la pipeta americana, la densidad aparente mediante el método del terrón parafinado y la evaluación del color del suelo seco y húmedo, utilizando las cartas de colores Munsell. En cuanto a las propiedades químicas, se determinó el pH en agua (relación suelo: agua 1:2), bases intercambiables Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} y K^{+} mediante extracción con acetato de amonio ($NH_4C_2H_3O_2$); las concentraciones de Na^{+} y K^{+} se cuantificaron por espectrofotometría de emisión de flama (EEF), mientras que Ca^{2+} y Mg^{2+} se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica (EAA). Adicionalmente, se determinó la capacidad de intercambio catiónico (CIC) a través del acetato de amonio, el porcentaje de saturación de bases (PSB), el contenido de nitrógeno total mediante el método semimicro Kjeldahl y el fósforo total por medio del método de Bray. El contenido de carbono orgánico del suelo se determinó por el método de combustión húmeda de Walkley y Black (1934), descrito por Van Reeuwijk (2003) y Page *et al*. (1982).

Posteriormente, las clases de tierra identificadas se clasificaron de acuerdo con el sistema de Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff 2014) y la Base de Referencia Mundial para los Recursos del Suelo (IUSS Working Group WRB 2015). Finalmente, se creó el mapa temático de las clases de tierra vinculadas al campo de investigación.

Cuantificación del carbono orgánico del suelo (COS)

En la segunda etapa se seleccionaron 18 sitios de muestreo, con el fin de asegurar una adecuada redundancia y representatividad de la información correspondiente a las clases de tierra previamente cartografiadas. La distribución espacial de los sitios y su representatividad se definieron en función de la superficie ocupada por cada clase de tierra en el mapa temático.

En cada ubicación se recolectaron muestras de suelo alteradas y se llevó a cabo una descripción de campo, teniendo en cuenta el manejo del cultivo de café asociado a los distintos sistemas agroforestales. La recolección de muestras del suelo se llevó a cabo a dos profundidades (0–30 cm y 30–60 cm), a través de la excavación de cepas de 20 × 20 × 60 cm^3. Adicionalmente, también se obtuvo el COS de las muestras de suelo de los horizontes de diagnóstico de los perfiles pedológicos realizados. Las muestras fueron debidamente almacenadas, etiquetadas y trasladadas al laboratorio. La preparación de la muestra de suelo comprendió el secado a temperatura ambiente, la tamización mediante una malla de 2 mm, la extracción de todo material superior a este tamaño

(piedras y raíces), la molienda, la homogeneización y el almacenamiento para su análisis subsecuente.

Se determinó el porcentaje de carbono orgánico en el suelo a través del método de combustión húmeda de Walkley y Black (1934). La densidad aparente ($Mg \cdot m^{-3}$) se estimó utilizando el método del terrón parafinado (Anderson e Ingram 1994). Subsecuentemente, se determinó el contenido total de carbono orgánico a partir de la materia orgánica, dividiéndola entre el factor de Van Bemmelen (1.724), fundamentándose en la suposición de que la materia orgánica contiene aproximadamente el 58 % de carbono orgánico. Para la cuantificación del carbono orgánico del suelo (COS), se empleó la fórmula propuesta por Etchevers *et al*. (2005):

$$COS\frac{Mg}{ha} = \%C * P * \rho b$$

Dónde: COS = contenido de carbono orgánico del suelo ($Mg \cdot ha^{-1}$), %C = porcentaje de C obtenido del analizador automático, P = profundidad de muestreo (m), ρb = Densidad aparente ($Mg \cdot m^{-3}$).

Para calcular el total de carbono almacenado por profundidad, se combinaron los valores de las dos capas estudiadas (0–30 y 30–60 cm) en cada lugar de muestreo. En el caso de los perfiles de suelo, se realizó el cálculo por la adición del carbono acumulado en todos los horizontes edáficos detectados. Debido a que el contenido de carbono orgánico en el suelo (COS) no mostró una distribución normal, la información se transformó a través de una raíz cuadrada. Posteriormente, los valores transformados se analizaron por análisis de varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey ($p < 0.05$), con el software R versión 4.3.1, para identificar diferencias estadísticas entre las clases de suelo. Los resultados obtenidos se emplearon para la elaboración del mapa temático de carbono secuestrado en el suelo.

RESULTADOS

Con los criterios de relieve, orientación, rugosidad, color del suelo y presencia o ausencia de vegetación asociada a sistemas agroforestales (SAF), se identificaron inicialmente 13 zonas de características homogéneas. Pero, en la investigación de campo bajo el enfoque etnoedafológico, que incluyó la confección de cartografía, recorridos de campo y entrevistas con productores (Figura 2), se identificaron seis categorías de tierras locales: a) Negra, b) Barrial amarillo, c) Barrial colorado, d) Cañada, e) Tepocha y f) Polvillo.

Las tierras se diferenciaron mediante un esquema jerárquico de tres niveles. En el primer nivel se tomaron en cuenta aspectos como el color y la textura del suelo; en el segundo, se analizaron aspectos como la estructura, la profundidad efectiva y la piedra; y en el tercero, se analizaron aspectos como el manejo, la actividad agrícola y el uso de la tierra relacionados con la producción de café, bambú, maíz, limón y caña de azúcar (Figura 3).



Figura 2. Entrevista a productores para la identificación de clases de tierras

Conforme a los informantes locales, la Tierra Negra se distingue por tener tonalidades oscuras (negro y pardo oscuro), textura franca, alta capacidad de infiltración de agua y consistencia no dura. Además, se caracteriza por preservar niveles apropiados de nutrientes, lo cual disminuye la necesidad de aplicación de fertilizantes sintéticos. Esta categoría de terreno es reconocida por los productores como la más propicia para la producción de café (Figura 3a).

Según los productores, este tipo de terreno exige la implementación de fertilizantes sintéticos, enmiendas orgánicas o desechos de cosecha (composta) para preservar la productividad agrícola (Figuras 3b y 3c). Se distingue como un suelo ácido, con una consistencia dura en condiciones de sequedad y pegajosa en condiciones de humedad, además de una permeabilidad reducida. Su comportamiento físico es similar al del barro, de donde deriva su denominación local. Según los productores, este tipo de terreno exige la implementación de fertilizantes sintéticos, enmiendas orgánicas o desechos de cosecha (composta) para preservar la productividad agrícola (Figuras 3b y 3c).

La Tierra Cañada se distingue por una textura fina y se ubica principalmente en barrancos y áreas contiguas a cuerpos acuáticos, tales como ríos y arroyos. Se caracteriza por su pH ácido y, según los productores, requiere la aplicación de fertilizantes sintéticos, así como la utilización de abonos orgánicos y residuos de cosecha (composta) para mantener su productividad agrícola (Figura 3d). Finalmente, los productores ven a la Tierra Tepocha como ineficiente para el cultivo de café, a causa de su elevado nivel de degradación (Figura 3e). En cuanto a la Tierra Polvillo (Figura 3f), se distingue por una textura suelta, lo cual resulta en una producción de café de bajo rendimiento. Por lo tanto, requiere aportaciones orgánicas y fertilización sintética de forma anual. Es pertinente destacar que todos los tipos de tierra, con la excepción de la Tierra Tepocha, están destinados a la producción de café y a otros cultivos agrícolas, tales como la caña de azúcar, el limón y el maíz. No obstante, la intensidad de las prácticas agronómicas necesarias para mantener la productividad varía entre las distintas clases de tierra.



Figura 3. Clases de tierra de ejidos de Cotecontla y Sabanas. De izquierda a derecha: a) negra, b) barrial amarillo, c) barrial colorado, d) cañada, e) tepocha y f) polvillo.

La distribución geoespacial de las clases de tierra (Figura 4) mostró que la Tierra Barrial colorado presentó la mayor cobertura, con un 29% del área total (112.5 ha), seguida de la Tierra Negra, con un 26% (100.7 ha), la Tierra Barrial amarillo, con un 25% (95.4 ha), y la Tierra Cañada, con un 20% (74.8 ha). Estas categorías de terreno están primordialmente destinadas a la producción de café y caña de azúcar, y demandan prácticas de gestión diferenciadas en función de sus propiedades edáficas. Es importante destacar que las clases de tierra Tepocha y Polvillo no pudieron ser representadas cartográficamente debido a que su superficie no fue suficiente para proporcionar una delimitación cartográfica confiable a la escala de trabajo utilizada (Figura 2).

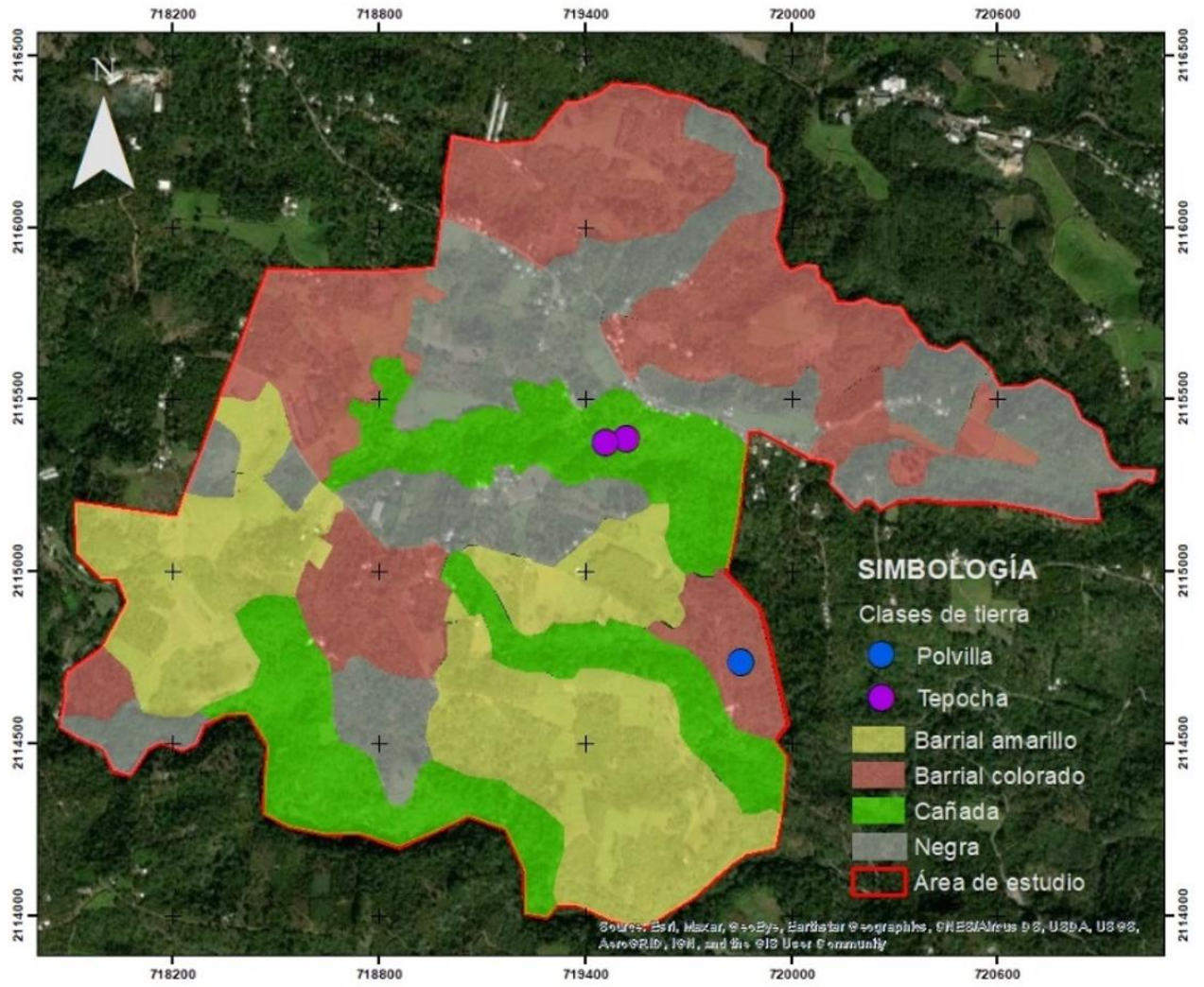


Figura 4. Mapa temático de clases de tierra de ejidos de Cotecontla y Sabanas, Huatusco

En total, se describieron cinco perfiles pedológicos, correspondientes a las clases de tierra identificadas. Sin embargo, la descripción de un perfil en Tierra Polvillo no fue posible debido a su ubicación en la pendiente de la ladera, lo cual limitó la apertura y caracterización del perfil. Las Tablas 1 y 2 muestran los rasgos físicos y químicos más relevantes de los perfiles estudiados; corresponden a las tierras de origen Negra, Barrial colorado, Barrial amarillo, Cañada y Tepocha.

Con la información de campo y los datos de los análisis físicos y químicos, se clasificaron taxonómicamente los suelos de las clases de tierra identificadas. La Tabla 3 presenta la clasificación taxonómica, integrando el conocimiento local con dos sistemas formales de clasificación de suelos. Los gráficos evidencian una correspondencia consistente entre ambos sistemas y facilitan la interpretación de los procesos edáficos predominantes en cada clase de tierra.

La clasificación taxonómica de los suelos por clase de tierra, de acuerdo con el sistema de Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff 2014), permitió agruparlos en cuatro órdenes. Los Alfisols presentaron la mayor cobertura, con un 54% de la superficie, seguidos por los Mollisols (26%), los Inceptisols (19%) y, finalmente, los Entisols, con un 1% de cobertura, estos últimos sin

representación cartográfica (Tabla 3, Figura 5a). Conforme a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB), se observó una distribución equivalente en términos de cobertura: los Acrisols constituyeron el 54% de la superficie, seguidos por los Phaeozems con un 26%, los Leptosols con un 19% y los Cambisols con menos del 1%, estos últimos sin representación cartográfica (Tabla 3, Figura 5b).

Tabla 1. Propiedades físicas de los perfiles edafológicos de cada clase de tierra identificada

Clase de tierra	Horizonte diagnóstico (cm)	Color Seco	Nombre	Color Húmedo	Nombre	Dap ($Mg \cdot m^{-3}$)	A%	L%	R%	Clase textural
Barrial colorado	0-15	10YR 3/3	pardo oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro	1.29	2.8	29.5	67.7	arcilloso
	15-34	10YR 5/6	pardo amarillento	5YR 3/4	Pardo rojizo oscuro	1.36	1.0	22.7	76.3	arcilloso
	34-106	10YR 5/7	pardo amarillento	5YR 3/3	Pardo rojizo oscuro	1.41	2.0	26.1	71.9	arcilloso
Cañada	0-15	10YR 5/4	pardo amarillento	10YR 3/4	Pardo amarillento oscuro	1.25	8.8	41.6	49.6	arcillo limoso
	15-109	10YR 6/4	pardo amarillento claro	10YR 3/6	Pardo amarillento oscuro	1.01	7.4	37.2	55.5	arcilloso
	109-155	7.5YR 7/2	gris rosado	7.5YR 4/4	pardo	1.02	13.1	51.3	35.6	Franco Arcillo limoso
Barrial amarillo	0-12	10YR 3/4	Pardo amarillento oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro	1.31	3.8	23.5	72.7	arcilloso
	12-37	10YR 3/6	Pardo amarillento oscuro	7.5YR 3/4	pardo oscuro	1.28	1.2	12.9	85.9	arcilloso
	37-65	10YR 5/8	pardo amarillento	5YR 3/4	Pardo rojizo oscuro	1.33	0.5	6.6	92.9	arcilloso
	65-125	10YR 6/8	amarillo pardo	5YR 3/4	Pardo rojizo oscuro	1.42	0.5	10.4	89.1	arcilloso
Negra	0-19	10YR 3/3	pardo oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro	1.17	5.1	28.8	66.1	arcilloso
	19-40	10YR 3/6	Pardo amarillento oscuro	10YR 3/6	Pardo amarillento oscuro	1.32	1.3	18.6	80.1	arcilloso
	40-69	10YR 3/3	pardo oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro	1.38	0.8	14.7	84.6	arcilloso
	69-90	10YR 5/8	pardo amarillento	10YR 3/6	Pardo amarillento oscuro	1.38	1.7	13.1	85.2	arcilloso
Tepocha	0-12	10YR 6/6	amarillo pardo	10YR 4/6	Pardo amarillento oscuro	1.35	15.2	30.8	54.0	arcilloso
	12-72	10YR 7/8	amarillo	10YR 4/4	Pardo rojizo oscuro	1.47	9.5	38.7	51.8	arcilloso
	72-84	10YR 6/6	amarillo pardo	10YR 4/6	Pardo rojizo oscuro	1.41	5.5	35.9	58.6	arcilloso
	84-110	10YR 7/6	amarillo	10YR 4/6	Pardo rojizo oscuro	1.49	14.4	36.3	49.3	arcilloso

Dónde: Dap ($Mg \cdot m^{-3}$) = densidad aparente; A (%) = porcentaje de arena; L (%) = porcentaje de limo y R (%) = porcentaje de arcilla.

En cuanto al contenido de carbono orgánico del suelo (COS), el porcentaje más alto se observó en la clase de tierra Cañada, con una contribución del 26%, seguida por el Barrial amarillo, con un 24%. En tercer lugar, se encuentra el Barrial amarillo, con un 24%. En tercer lugar, se ubicaron las tierras de Barrial colorado, que aportaron un 21 % del COS total. Las categorías de Tierra Negra y Tepocha presentaron las contribuciones relativas más bajas, con un 18% y 11%, respectivamente (Tabla 4).

Tabla 2. Propiedades químicas de los perfiles edafológicos de cada clase de tierra identificada

Clase de tierra	Horizonte diagnostico (cm)	CO	MO	pH	Na	K	Ca	Mg	CIC	Ca/Mg	P (MgKg^{-1})	PSI	N %	C.E. (Ms)
		%			(cmol Kg^{-1})									
Barrial colorado	0-15	2.24	3.86	4.9	0.49	0.59	22.12	8.04	29.09	2.75	3.94	1.69	0.07	0.39
	15-34	1.12	1.93	5.5	0.40	0.13	3.50	5.99	37.91	0.58	0.31	1.06	0.04	0.16
	34-106	0.37	0.64	5.4	0.56	0.10	14.58	25.00	41.72	0.58	5.62	1.34	0.02	0.09
Cañada	0-15	0.75	1.29	5.9	0.42	0.08	3.62	12.52	42.53	0.29	6.91	0.99	0.17	0.18
	15-109	1.12	1.93	5.6	0.43	0.91	13.48	10.81	46.94	1.25	8.21	0.90	0.07	0.09
	109-155	0.37	0.64	5.6	0.45	0.74	19.25	12.60	27.28	1.53	3.68	1.64	0.02	0.08
Barrial amarillo	0-12	2.24	4.50	4.5	0.56	0.81	4.68	22.98	27.48	0.20	22.58	1.43	0.14	0.18
	12–37	0.75	1.29	4.9	0.49	0.48	4.18	22.27	38.52	0.19	2.77	1.81	0.07	0.13
	37–65	0.75	1.29	5.2	0.49	0.54	7.70	25.00	34.30	0.31	1.22	2.14	0.04	0.09
	65–125	0.37	0.64	5.6	0.54	0.15	3.06	5.92	29.69	0.52	0.31	1.14	0.02	0.09
Negra	0-19	2.61	3.86	6.2	0.58	0.37	7.64	15.21	27.08	0.50	9.11	1.19	0.16	0.42
	19–40	0.75	1.29	5.6	0.40	0.08	2.97	9.15	35.11	0.32	3.55	2.20	0.03	0.12
	40–69	0.37	0.64	5.5	0.45	0.14	2.33	6.58	37.51	0.35	0.31	0.96	0.03	0.06
	69–90	0.37	0.64	5.5	0.67	0.30	4.73	9.01	30.49	0.53	0.96	0.84	0.02	0.03
Tepocha	0-12	0.37	0.64	5.5	0.36	0.14	23.45	25.00	37.31	0.94	1.61	1.15	0.00	0.07
	12–72	0.37	0.64	5.3	0.36	0.13	12.37	25.00	42.33	0.49	0.05	2.45	0.00	0.10
	72–84	0.37	0.64	5.3	0.45	0.12	7.44	25.00	38.92	0.30	0.05	1.69	0.00	0.10
	84–110	0.37	0.64	5.1	0.40	0.10	7.28	4.84	16.45	1.50	1.09	1.06	0.00	0.10

Dónde: CO = carbono orgánico; MO = materia orgánica; Na (cmol Kg^{-1}) = sodio; K (cmol Kg^{-1}) = potasio; Ca (cmol Kg^{-1}) = calcio; Mg (cmol Kg^{-1}) = magnesio; CIC (cmol Kg^{-1}) = capacidad de intercambio catiónico; P (MgKg^{-1}) = fósforo; PSI = porcentaje de saturación de bases; N (%) = nitrógeno; C.E (Ms)= conductividad eléctrica.

Tabla 3. Clasificación de los suelos de los ejidos Sabanas y Cotecontla, Huatusco, con el sistema WRB y el sistema de Taxonomía de Suelos.

Clase de tierras	Base de Referencia Mundial (WRB,2014)		Clave para la Taxonomía de Suelos (2014)	
	Grupo de Referencia	GSR (Prefijos)	Orden	Subgrupos
Negra	Phaeozems	Someric Phaeozems (clayic, ochric)	Mollisols	Pachic Argiudolls
Barrial amarillo	Acrisols	Nudiargic Acrisols (clayic, profondic)	Alfisols	Rodhic Kandiudalfs
Barrial colorado	Acrisols	Nudiargic Rhodic Acrisols (clayic, profondic)	Alfisols	Typic Kandiudalfs
Cañada	Leptosols	Esqueletic Leptosols (clayic)	Entisols	Lithic Udorthens
Tepocha	Cambisols	Vertic Dystric Cambisols (clayic)	Inceptisols	Lamellic Dystrudepts

Al examinar el almacenamiento de COS distribuido en los 18 lugares de muestreo, se identificaron diferencias entre las clases de tierra. La tierra Negra presentó el mayor contenido de COS, con promedio de 123.35 ± 53.35^{a} Mg·ha^{-1}, seguida de Barrial colorado, con 121.18 ± 61.51^{a} Mg·ha^{-1}. En tercer lugar, se ubicó la tierra Barrial amarillo, con 97.46 ± 38.60^{a} Mg·ha^{-1}. Finalmente, las clases Polvillo, Cañada y Tepocha registraron los menores almacenamientos de COS, con valores de 58.38 ± SD^{b} Mg·ha^{-1}, 50.79 ± 31.74^{ab} Mg·ha^{-1} y 14.31 ± 10.55^{ab} Mg·ha^{-1}, respectivamente (Figura 6).

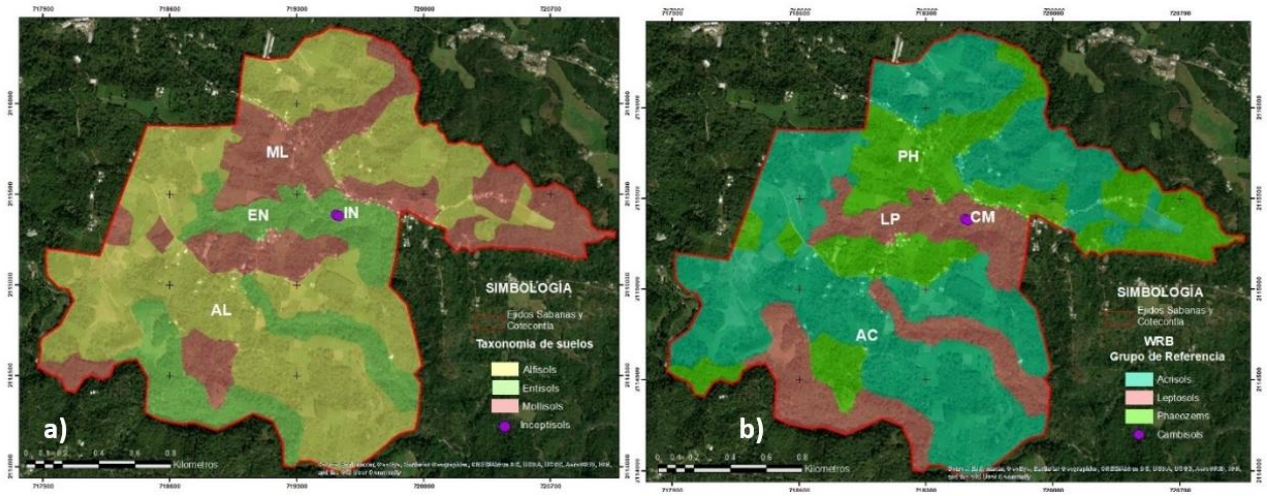


Figura 5. Distribución geoespacial de grupos de suelos de acuerdo con: a) WRB (2014); b) Soil Survey Staff (2014).

Tabla 4. Contenido de carbono orgánico (Mg·ha^{-1}) dentro de cada perfil de suelo ubicado en las diferentes clases de tierra en el municipio de Huatusco, Veracruz, México.

Clase de Tierra	WRB	Taxonomía de suelos	Profundidad del perfil (cm)	Superficie (ha)	COS (Mg·ha^{-1})
Barrial colorado	Acrisols	Alfisols	106	112.5	110.27 ^{a}
Barrial amarillo	Acrisols	Alfisols	125	95.4	124.72 ^{a}
Cañada	Leptosols	Entisols	155	74.8	137.97 ^{ab}
Negra	Phaeozems	Mollisols	90	100.7	96.14 ^{a}
Tepocha	Cambisols	Inceptisols	110	-	59.72 ^{ab}

Letras diferentes indican diferencias significativas, Tukey ($p < 0.05$).

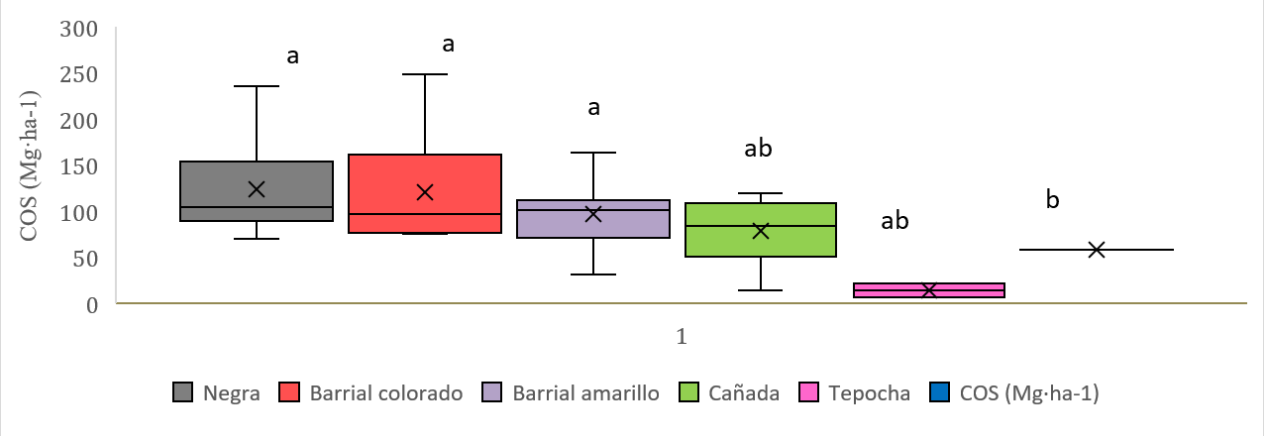


Figura 6. Contenido de carbono orgánico por clase de tierra (Mg·ha^{-1}). Letras diferentes indican diferencias significativas, Tukey ($p < 0.05$).

La distribución vertical del carbono orgánico del suelo (COS) mostró un patrón diferenciado entre profundidades. En términos generales, la mayor reserva de carbono se concentró en el estrato subsuperficial (30-60 cm), con un valor promedio de 140.05 ± 58.12^{a} Mg·ha^{-1}, mientras que el estrato superficial (0-30 cm) presentó un contenido significativamente menor, con 71.93 ± 34.36^{b} Mg·ha^{-1}. Al examinar las observancias, las mismas resultaron ser estadísticamente significativas ($p < 0.05$),

lo cual evidencia la influencia de la profundidad del suelo en la conservación de COS. Al analizar el estrato superficial (0-30 cm) por clase de tierra, la tierra Negra registró el mayor contenido de COS, con 97.58 Mg·ha^{-1}, seguida de Barrial colorado (89.97 Mg·ha^{-1}) y Barrial amarillo (76.31 Mg·ha^{-1}). En contraste, las clases Polvillo, Cañada y Tepocha presentaron los valores más bajos, con 58.34 Mg·ha^{-1}, 50.79 Mg·ha^{-1} y 14.30 Mg·ha^{-1}, respectivamente.

En el estrato subsuperficial (30-60 cm), la tierra Barrial colorado tuvo mayor almacenamiento de COS, con 152.40 Mg·ha^{-1}, seguida por la tierra Negra (149.14 Mg·ha^{-1}) y Barrial amarillo (118.62 Mg·ha^{-1}). Adicionalmente, Polvillo y Tepocha no fueron incluidas en este rango de profundidad por su naturaleza somera, inferior a 60 cm. En lo que respecta al contenido total de carbono orgánico del suelo (COS) por superficie, la categoría de tierra negra tuvo el mayor valor, con 12 421.34 Mg, seguido por Barrial colorado, con 11 560.57 Mg. Las tierras Barrial amarillo y Cañada registraron contenidos de 10 964.25 Mg y 3 799.09 Mg, respectivamente.

DISCUSIÓN

El enfoque etnoedafológico, la caracterización físico-química y la clasificación taxonómica de los suelos, facilitó comprender de forma integral la variabilidad edáfica y la dinámica del carbono orgánico del suelo (COS) en los sistemas agroforestales de café (SAF) de los ejidos evaluados. La representación de seis tipos de tierra locales (Negra, Barrial amarillo, Barrial colorado, Cañada, Tepocha y Polvillo) no solo muestra variaciones edáficas, sino también la percepción, experiencia y saber acumulado por los productores a través del tiempo.

El vínculo entre el saber local y la clasificación científica ha sido documentada en investigaciones etnoedafológicas. Las cuales reportan que los agricultores identifican y gestionan los suelos con base en atributos funcionales vinculados con la productividad y comportamiento agronómico (Barrera-Bassols y Zinck 2003, Barrera-Bassols *et al*. 2021, Reza-Solís *et al*. 2024). En términos generales, el saber tradicional es un sistema lógico y funcional que puede utilizarse de forma complementaria y sinérgica con el conocimiento técnico-científico del terreno (Rushemuka *et al*. 2014).

El enfoque etnoedafológico es benéfico en contextos donde la información técnica previa es limitada, ya que facilita la elaboración de cartografía temática, la definición de unidades edáficas funcionales y la integración de la perspectiva del productor y del experto. Este enfoque es un instrumento eficaz para la gestión sostenible del suelo, proporcionando información precisa, de bajo costo y de accesibilidad inmediata, especialmente en contextos agrícolas complejos como los cafetales de montaña (Zinck *et al*. 2016, Berkes 2017, Aguilar-Orea *et al*. 2019).

Esta integración entre la percepción y la sabiduría empírica de los productores con la información de las propiedades físicas y químicas del suelo es un puente de comunicación eficaz entre los conocimientos locales y el saber científico. Este conjunto favorece la toma de decisiones fundamentadas en relación con la gestión y conservación del suelo, robusteciendo la pertinencia y factibilidad de las estrategias de manejo a nivel local (Rushemuka *et al*. 2014). En este contexto, la aplicación de metodologías etnoedafológica tienen mayor relevancia en regiones donde los

productores poseen conocimiento detallado de sus suelos, ya que ello permite mayor sinergia con el conocimiento técnico-científico (Barrera-Bassols *et al*. 2006). Esta convergencia en los resultados obtenidos en la presente investigación (Tabla 3). Destacar que los suelos de la categoría de Tierra Negra fueron identificados por los productores y los análisis edafológicos, siendo estos los de mayor calidad agrícola. En la literatura científica, se identifica que estos suelos son fértiles y adecuados para la agricultura (Buol *et al*. 2011). La textura predominante es arcillosa y los colores pardos oscuros persistentes indican acumulación de materia orgánica y condiciones favorables para la actividad biológica. La confirmación de esta afirmación se tuvo con los análisis químicos, los cuales evidencian los mayores contenidos de CO y MO en los estratos superficiales. La densidad aparente permanece estable, con valores que oscilan entre 1.17 y 1.38 Mg m^{-3}, lo que indica estabilidad estructural óptima y buena porosidad, condiciones propicias para el crecimiento radicular y la infiltración de agua (Ortiz 2019). La CIC es elevada, asociada tanto a la fracción arcillosa como al contenido de MO; sin embargo, el porcentaje de saturación de bases (PSB) es bajo y los contenidos de Na^{+}, K^{+}, Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables disminuyen con la profundidad, reflejando la influencia de procesos de lixiviación prolongados, característicos de ambientes tropicales húmedos (Buol *et al*. 2011, Doetterl *et al*. 2021). El pH moderadamente ácido (5.5-5.6), junto con contenidos bajos de fósforo disponible, nitrógeno total y conductividad eléctrica, limita parcialmente la productividad del sistema. Pero, la combinación de un pH ácido, alta CIC y baja PSB indica un sistema con un alto potencial para el almacenamiento y la estabilización del carbono orgánico, especialmente en asociaciones órgano-minerales. Esto se alinea con lo reportado para suelos bajo sistemas agroforestales tropicales (Six *et al*. 2002, Angst *et al*. 2023).

Las clases de tierra Barrial colorado y Barrial amarillo fueron la unidad edáfica de mayor extensión en el área de estudio (54%), presentan perfiles con texturas arcillosas, densidad aparente moderadamente elevada y coloraciones rojizas y amarillas, que se asocian con presencia elevada de óxidos de hierro, indicador de alto grado de intemperización química (IUSS Working Group WRB 2015). Desde la perspectiva química, el contenido de CO y MO decrece con la profundidad, patrón que se replica en la distribución del nitrógeno total, lo que indica relación entre estos elementos. El pH ácido y el bajo PSB indican fertilidad química limitada. La predominancia de Ca^{2+}, la relación Ca/Mg y la baja saturación de bases indican un sistema químicamente empobrecido. La elevada CIC, asociada a la alta fracción arcillosa, favorece la estabilización del COS en horizontes subsuperficiales mediante complejos órgano-minerales y adsorción en óxidos de Fe y Al (Torn *et al.* 1997, Six *et al*. 2002, Wiesmeier *et al*. 2019). Los bajos contenidos de fósforo disponible pueden explicarse por procesos de fijación fosfórica, documentados en Acrisols tropicales, donde el P es inmovilizado por óxidos de hierro y aluminio (Baorong *et al*. 2021). La aplicación habitual de pulpa de café, indicada por los productores, contribuye a la MO. Pero, también puede intensificar la acidificación del suelo, reforzando estas limitaciones químicas, como se ha documentado en otros sistemas cafetaleros de Mesoamérica (De-Beenhouwer *et al*. 2016, Montagnini *et al*. 2023).

Los suelos de la clase Cañada se caracterizan por una variabilidad textural, que va de arcillosa a franco arcillo-limosa, y por su localización en pendientes pronunciadas. Estas condiciones limitan su profundidad efectiva y favorecen procesos erosivos; sin embargo, los valores de densidad aparente bajos a moderados indican una estructura favorable para el desarrollo radicular y el movimiento de agua y aire. Desde una perspectiva química, los contenidos de CO y MO son

moderados en los horizontes superficiales, y su contenido disminuye con la profundidad. El pH ligeramente ácido es menos restrictivo para la disponibilidad de nutrimentos en comparación con otras clases de tierra. La CIC es elevada, aunque el PSB es bajo, lo que evidencia la influencia de procesos de lixiviación. Los contenidos altos de Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables contrastan con los bajos niveles de fósforo disponible y nitrógeno total. La baja conductividad eléctrica descarta problemas de salinidad. Aunque estos suelos presentan una capacidad reducida para almacenar a el COS debido a que son someros. No obstante, su contribución porcentual al COS total es elevada en comparación con su superficie. Esto puede atribuirse a la constante adición de desechos orgánicos, la cobertura vegetal permanente y la menor perturbación mecánica del suelo, factores que favorecen la acumulación de carbono en la superficie (Jobbágy y Jackson 2000, Lal 2004, Fissore *et al*. 2021).

Los suelos de la clase Tepocha presentan desarrollo pedogenético incipiente, con horizontes poco diferenciados, bajos contenidos de COS (<1%) y textura arcillosa compacta. Estas características limitan su potencial productivo y confirman la percepción local de estos suelos como tierras sin utilidad agrícola. La observación es coincide con lo reportado para suelos jóvenes o degradados en entornos tropicales, donde la capacidad de estabilización del carbono es limitada (Lal 2010, Buol *et al*. 2011). Hallazgos similares fueron reportados por Sánchez-Guzman *et al*. (2002) en suelos del estado de Veracruz, México; cultivos de caña de azúcar y frutales, donde se documentó la identificación de tierras locales denominadas Barrial, en correspondencia con unidades edáficas formales. De forma similar, Aguilar-Orea *et al*. (2019), en sistemas cafetaleros del estado de Veracruz, reconocieron las clases de tierra Barrial, Polvillo y Negra, lo que refuerza la validez y reproducibilidad del conocimiento etnoedafológico en distintos contextos productivos y regiones del estado de Veracruz. Lo que indica que se ha demostrado que los productores locales poseen conocimiento profundo de su entorno biofísico, así como una comprensión de la idoneidad de los suelos en función del uso y manejo dentro de los sistemas agrícolas, en especial en los sistemas SAF de café.

La clasificación realizada con la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff 2014) indicó que la clase de tierra Negra corresponde, a nivel de subgrupo a Pachic Argiudolls. Esto sugiere la presencia de un epipedón mólico totalmente desarrollado, que se caracteriza por elevado contenido de materia orgánica y alta saturación de bases, rasgos propios de terrenos con elevada fertilidad natural y se desarrollan en un ambiente de humedad alta, lo que significa que hay agua disponible durante gran parte del año. Así, el grupo Argiudolls se distingue por la presencia de un horizonte argílico subyacente al epipedón mólico, resultado de procesos de iluviación de arcilla, lo que refleja un grado avanzado de desarrollo pedogenético y contribuye a su elevada capacidad productiva y potencial de almacenamiento de carbono (Buol 2011, Soil Survey Staff 2014, USDA 2022).

Las clases de tierra Barrial amarillo y Barrial colorado se clasifican, respectivamente, dentro de los subgrupos Rhodic Kandiudalfs y Typic Kandiudalfs. Ambos pertenecen al orden Alfisols, característico de ambientes tropicales húmedos, donde predominan procesos de intemperización química avanzada, así como de eluviación e iluviación de arcillas. Los Rhodic Kandiudalfs se distinguen principalmente por la presencia de colores rojos intensos, asociados a elevada concentración de óxidos de hierro, en particular hematita, lo que refleja condiciones oxidadas y alto grado de evolución pedogenética. Estos suelos se desarrollan bajo un régimen de humedad údico

y presentan un horizonte kándico, caracterizado por la acumulación de arcilla de baja actividad, resultado de una intensa lixiviación de bases y sílice. Por su parte, los Typic Kandiudalfs representan el concepto central del subgrupo, sin calificadores adicionales que indiquen rasgos distintivos extremos. En general, presentan tonalidades amarillosas a pardas, así como un horizonte kándico bien definido, aunque con menor expresión de los colores rojos intensos observados en los Rhodic (Buol 2011, Soil Survey Staff 2014). En conjunto, ambos tipos de suelo se caracterizan por fertilidad natural limitada, asociada a su reacción ácida, baja saturación de bases y a procesos de fijación de fósforo, lo que coincide con su percepción local como suelos "barriales" y con las restricciones productivas observadas en los sistemas agroforestales de café.

La tierra Cañada se clasificó dentro del orden Entisols, específicamente en el subgrupo Lithic Udorthents. Estos suelos se caracterizan por ser jóvenes, con escaso desarrollo pedogenético y limitaciones físicas severas, asociadas con su reducida profundidad efectiva y un contacto lítico somero. Como consecuencia, presentan alta susceptibilidad a procesos erosivos, especialmente en condiciones de pendientes pronunciadas. En el contexto de los sistemas agroforestales de café, estos suelos requieren la implementación de prácticas de manejo conservacionista, como el mantenimiento de cobertura vegetal permanente, el control de la escorrentía superficial y la mínima perturbación del suelo, para reducir la pérdida de suelo, conservar la humedad y mantener la productividad del sistema (Buol 2011, Soil Survey Staff 2014).

Mientras que, los suelos del orden Inceptisols, en particular el subgrupo Lamellic Dystrudepts, se distinguen por un desarrollo pedogenético incipiente, con horizontes poco diferenciados, aunque con grado de evolución superior en comparación con los Entisols. Además, se observa la presencia de lamelas, que son bandas finas y discontinuas de acumulación de arcilla en el perfil, las cuales evidencian procesos iniciales de iluviación. Por estas características, los Lamellic Dystrudepts pueden considerarse suelos transicionales, que representan una etapa intermedia entre suelos jóvenes y aquellos más evolucionados con horizontes argílicos bien definidos (Buol 2011, Soil Survey Staff 2014). De acuerdo con los resultados obtenidos de la descripción de campo y los análisis de laboratorio, la clasificación de suelos bajo el sistema WRB indicó que las clases de tierra Negra, Barrial amarillo, Barrial colorado, Cañada y Tepocha corresponden, a nivel de unidad, a los grupos Phaeozems, Acrisols, Acrisols, Leptosols y Cambisols, respectivamente (IUSS Working Group WRB 2015). En la Tabla 4 se presenta, la clasificación a nivel de unidad y la asignación de los calificadores primarios y secundarios para cada perfil analizado. Estos resultados contrastan con la información reportada en el Conjunto de datos vectoriales edafológicos, escala 1:250 000, Serie II (Continuo Nacional) para la zona de estudio, donde únicamente se reconoce la presencia de suelos Acrisols. En contraste, el presente estudio, basado en la descripción de perfiles pedológicos y la aplicación de criterios taxonómicos, permitió identificar la presencia de cuatro grandes grupos de suelos. Esta discrepancia coincide con lo señalado en estudios previos, que destacan las limitaciones de la cartografía edafológica oficial, particularmente asociadas a la escala de trabajo, lo que reduce su utilidad para la planeación y el manejo sostenible del recurso suelo (Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena 2001, Sánchez-Guzmán *et al*. 2002, Pérez-Rodríguez *et al*. 2023). La clasificación de tierras basada en el conocimiento local permitió diferenciar cinco clases de tierra, lo que evidencia que el conocimiento tradicional de los productores posee un nivel de detalle y consistencia comparable al de los sistemas científicos de clasificación de suelos, como la

WRB y la Taxonomía de Suelos, cuando se trabaja a escalas más finas (1:20 000). Este resultado confirma que las categorías locales no son meramente descriptivas, sino que reflejan procesos edáficos reales y funcionales, con implicaciones directas para el uso y manejo del suelo (Aguilar-Orea *et al.* 2019, Morales-Espinoza *et al*. 2021, Villafuerte-González *et al.* 2021).

Dentro de los grupos de suelos identificados y en relación con el COS se encontró que el mayor porcentaje de COS por perfil pedológico se registró en la Tierra Cañada (26%), seguida de Barrial amarillo (24%) y Barrial colorado (21%), mientras que las clases Negra y Tepocha aportaron un 18% y 11%, respectivamente. Sin embargo, al analizar el almacenamiento absoluto de COS, la Tierra Negra presentó los mayores valores promedio (123.35 ± 53.35 $Mg \cdot ha^{-1}$), seguida de Barrial colorado (121.18 ± 61.51 $Mg \cdot ha^{-1}$) y Barrial amarillo (97.46 ± 38.60 $Mg \cdot ha^{-1}$). A escala de paisaje, la Tierra Negra tuvo el mayor contenido total de COS por superficie (12 421.34 Mg), seguida de Barrial colorado (11 560.57 Mg), Barrial amarillo (10 964.25 Mg) y Cañada (3 799.09 Mg). Estas diferencias están determinadas por la interacción entre la clase de tierra, el relieve, el tipo de SAF, el manejo agronómico y la diversidad estructural de especies arbóreas y arbustivas asociadas al café, factores reconocidos como determinantes clave del secuestro de carbono en sistemas agroforestales (De-Beenhouwer *et al.* 2016, Wiesmeier *et al.* 2019). La distribución vertical del COS mostró que la mayor reserva de carbono se localiza en el estrato de 30-60 cm (140.05 ± 58.12 $Mg \cdot ha^{-1}$), en contraste con el estrato superficial de 0-30 cm con 71.93 ± 34.36 $Mg \cdot ha^{-1}$, con diferencias significativas ($p < 0.05$). Este patrón, contrario a lo reportado en otros estudios, resalta la importancia del carbono subsuperficial como reservorio estable, con tiempos de residencia más largos y mayor resistencia a perturbaciones (Chen *et al.* 2021).

Finalmente, en el estrato superficial, la Tierra Negra presentó el mayor contenido de COS, mientras que en el estrato subsuperficial destacaron las tierras Barrial colorado y Negra. Las clases Cañada, Polvillo y Tepocha no fueron consideradas a esta profundidad debido a su carácter somero. Estos resultados confirman que la clase de tierra constituye un factor determinante del potencial de secuestro de carbono en los SAF de café y subrayan la relevancia de integrar el conocimiento local con la edafología formal para el diseño de estrategias de manejo diferenciadas, orientadas a la sostenibilidad productiva y a la mitigación del cambio climático.

CONCLUSIONES

Los resultados demuestran que la integración del enfoque etnoedafológico permitió cuantificar con precisión el almacenamiento de carbono orgánico del suelo en los ejidos Sabanas y Cotecontla, Huatusco, al validar que las clasificaciones locales no solo reflejan criterios culturales, sino que se sustentan en propiedades edáficas medibles que rigen la dinámica del carbono. La evidencia analítica confirma que la caracterización tradicional optimizó la identificación de la variabilidad espacial y de las prácticas de manejo que favorecen la acumulación de carbono en los sistemas cafetaleros. Se concluye que el conocimiento local es un indicador técnico fiable para la evaluación de servicios ecosistémicos, permitiendo una interpretación contextualizada del potencial de secuestro de carbono en estos agroecosistemas de Veracruz.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y tecnologías (CONAHCYT) por el financiamiento total de este proyecto durante el periodo del 2019 al 2022.

DECLARACIÓN SOBRE USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

En la investigación y/o preparación de este manuscrito, los autores utilizaron ChatGPT con el objetivo de corrección en la discusión. La revisión, verificación, edición e interpretación de lo aportado por ChatGPT fue realizada por los autores, quienes asumen la total responsabilidad por el contenido publicado.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

Aguilar-Orea G, Ruiz-Rosado O, Ortiz-Solorio CA, Armidia-Alcudia L (2019) La etnoedafología como instrumento para la caracterización de agroecosistemas a nivel local, el caso de un ejido cafetalero del centro de Veracruz. Investigaciones geográficas 99: e59850. https://doi.org/10.14350/rig.59850

Anderson J, Ingram J (1994) Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods. 2nd Edition. CAB International. Wallingford, Reino Unido. 221p.

Angst G, Mueller KE, Castellano MJ, Vogel C, Wiesmeier M, Mueller CW (2023) Unlocking complex soil systems as carbon sinks: multi-pool management as the key. Nature Communications 14: 2967. https://doi.org/10.1038/s41467-023-38700-5

Baorong W, Shaosham A, Chao L, Yang L, Yakov K (2021) Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems. Soil Biology and Biochemistry 162: 108422. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108422

Barrera-Bassols N, Toledo VM (2005) Ethnoecology of the Yucatec Maya: Symbolism, knowledge and management of natural resources. Journal of Latin American Geography 4: 9-41.

Barrera-Bassols N, Zinck JA (2003) Ethnopedology: A worldwide view on the soil knowledge of local people. Geoderma 111: 171-195. https://doi.org/10.1016/S0016-7061 (02)00263-X

Barrera-Bassols N, Zinck JA, Van Ranst E (2006) Local soil classification and comparison of indigenous and technical soil maps in a Mesoamerican community using spatial analysis. Geoderma 135: 140-162. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.12.010

Barrera-Bassols N, Zinck JA, Van-Ranst E (2021) Local soil knowledge and scientific soil classification: Bridging scales and systems. Soil Use and Management 37: 234-246. https://doi.org/10.1111/sum.12689

Batjes NH (1996) Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European Journal of Soil Science 47: 151-163. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x

Bautista-Calderon EA, Gutiérrez-Castorena EV, Ordaz-Chaparro VM, Gutiérrez-Castorena M, Cajuste-Bontemps L (2018) Sistemas agroforestales de café en Veracruz, México: identificación y cuantificación espacial usando SIG, percepción remota y conocimiento local. Terra Latinoamericana 36: 261-273. https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.350

Berkes F (2017) Ecología sagrada. 4ta Edición. Routledge. Londres, Reino Unido. 384p. https://doi.org/10.4324/9781315114644

Buol SW, Southard RJ, Graham RC, McDaniel PA (2011) Soil genesis and classification. 6th Edition. John Wiley and Sons. New York, USA. 543p.

Chen L, Fang K, Wei B, Qin S, Feng X, Hu T, Ji Ch, Yang Y (2021) Soil carbon persistence governed by plant input and mineral protection at regional and global scales. Ecology Letters 24: 1018-1028. https://doi.org/10.1111/ele.13723.

De-Beenhouwer M, Aerts R, Honnay O (2016) A global meta-analysis of the biodiversity and ecosystem service benefits of coffee agroforestry. Agriculture, Ecosystems & Environment 222: 1-10. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.003

Doetterl S, Stevens A, Six J, Merckx R, Van Oost K, Casanova-Pinto M, Casanova-Katny A, Boeckx P (2021) Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate. Nature Geoscience 14: 540-545. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00763-3

Escamilla-Prado E, Ruiz-Rosado O, Zamarripa-Colmenero AZ, González-Hernández VA (2015) Calidad en variedades de café orgánico en tres regiones de México. Revista de Geografía Agrícola 55: 45-55.

Etchevers BJ, Monreal CM, Hidalgo C, Acosta M, Padilla J, López RM (2005) Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Editorial Colegio de Postgraduados. México, México. 29p.

Fissore C, Dalzell B J, Berhe A A, Bradford M A, Buchkowski R W, Crowther T W, Templer P H (2021) Soil organic carbon accumulation and persistence in managed ecosystems. Nature Reviews Earth & Environment 2: 483-497. https://doi.org/10.1038/s43017-021-00171-y

Hernández-Andrade EE, Ortiz-Solorio CA, Gutiérrez Del C, Gutiérrez-Castorena EV, Sánchez-Guzmán P (2018) Manejo local de los suelos cañeros en Tlaquiltenango, Morelos, México. Revista de Geografía Agrícola 61: 85-102. https://doi.org/10.5154/r.rga.2018.61.14

Hernández-Núñez HE, Andrade HJ, Suárez-Salazar JC, Sánchez JR, Gutiérrez DR, Gutiérrez-García GA, Casanoves F (2021) Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos Orientales de Colombia. Revista de Biología Tropical 69: 352-368.

INEGI (2008) Conjunto de datos vectoriales Unidades Climáticas. Escala 1:1 000 000. (Conjunto Nacional). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. http://www.inegi.org.mx. Fecha de consulta: 15 de mayo de 2025.

INEGI (2013) LiDAR DTM (Digital Terrain Model) 1:10 000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. http://www.inegi.org.mx. Fecha de consulta: 12 de enero de 2025.

IUSS, Grupo de trabajo WRB (2015) Base Referencia Mundial del recurso suelo 2014. Primera actualización. FAO. Roma, Italia. http://www.fao.org. Fecha de consulta: 12 de noviembre de 2025.

Jobbágy EG, Jackson RB (2000) The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications 10: 423-436.

Lal R (2004) Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma 123: 1-22. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032

Lal R (2010) Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. Bioscience 60(9): 708-72. https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.8

Licona-Vargas A, Ortiz-Solorio CA, Pájaro-Huerta D (1993) El uso de la fotointerpretación en la cartografía de clases de tierras campesinas. Geografía agrícola 18: 85-93.

Licona-Vargas AL, Ortiz-Solorio CA, Gutiérrez-Castorena MC, Manzo-Ramos F (2006) Clasificación local de tierras y tecnología del policultivo café-plátano para velillo-sombra en comunidades cafetaleras. Terra Latinoamericana 24: 1-7.

Masuhara A, Valdés-Velarde E, Pérez J, Gutiérrez D, Vázquez JC, Salcedo E, Juárez MJ, Merino A (2015) Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. Revista Amazónica Ciencia y Tecnología 4: 66-93.

Mazumder SY, Bania JK, Sileshi GW, Paul MK, Das AK, Nath AJ (2025) Variation of biomass and soil carbon storage and sequestration rates in different agroforestry systems with climatic zones and soil types. Environmental and Sustainability Indicators 26: 100642.

Montagnini F, Nair PKR, Kanninen M (2023) Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. Agroforestry Systems 97: 1-16.

Morales-Espinoza I, Ortiz-Solorio CA, Gutiérrez-Castorena C, Gutiérrez-Castorena EV (2021) Estudio Etnoedafológico para el reconocimiento de tipos de usos asociados con cadenas productivas en el ejido de Santa Cruz, Durango. Terra Latinoamericana 39: e853. https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.853

Nájera O (2002) El café orgánico en México. Cuadernos de desarrollo rural. Ciudad de México, México. 48p.

Oliveira SEP, Barreto-Garcia PAB, Monroe PHM, Pereira MG, Da-Silva-Martins KB, Dos-Santos TO, Figueira-da-Silva C, Santos LA, Nunes MR (2025) Do coffee agroforestry systems favor carbon and glomalin input in soil biogenic aggregates? Catena 249: 108685. https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108685

Ortiz SCA (2019) Edafología. Editorial Trillas. Ciudad de México, México. 400p.

Ortiz VB, Ortiz-Solorio CA (1990) Edafología. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 394p.

Ortiz-Solorio C (1993) Evolución de la ciencia del suelo en México. Ciencia 44: 23-32.

Ortiz-Solorio C, Pájaro-Huerta D, Ordaz-Chaparro VM (1991) Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie Cuadernos de Edafología 15. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 45p.

Ortiz-Solorio CA (2005) Metodología del levantamiento fisiográfico: Un sistema de clasificación de tierras. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 150p.

Ortiz-Solorio CA, Gutiérrez-Castorena MC (2001) La etnoedafología en México: Una visión retrospectiva. Etnobiología 1: 44-62.

Page AL, Miller RH, Keeney DR (1982) Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. Madison, USA. 1159P.

Pérez-Rodríguez G, Ortiz-Solorio CA, Gutiérrez-Castorena MC (2023) Ethnopedology, its evolution and perspectives in soil security: A review. Soil Security 10: 100121. https://doi.org/10.1016/j.soisec.2023.100121.

Quattrochi-Dale A, Goodchild-Michael F (1997) Scale in remote sensing and GIS. CRC Press. Boca Raton, USA. 432P. https://doi.org/10.1201/9780203740170.

Reza-Solís IJ, Romero-Rosales T, Hernández-Galeno CA, Valenzuela-Lagarda JL, Jimenez-Lobato V (2024) Saberes tradicionales en el cultivo de maíces nativos. Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan 12: 167-178.

Rushemuka NP, Bizoza RA, Mowo JG, Bock L (2014) Farmers' soil knowledge for effective participatory integrated watershed management in Rwanda: toward soil-specific fertility management and farmers' judgmental fertilizer use. Agriculture, Ecosystems & Environment 183: 145-159.

Sánchez-Guzmán P, Ortiz-Solorio CA, Gutiérrez-Castorena MC, Gómez DJ (2002) Clasificación campesina de tierras y su relación con la producción de caña de azúcar en el sur de Veracruz. Terra Latinoamericana 20: 359-369.

Six J, Conant RT, Paul EA, Paustian K (2002) Stabilization mechanisms of soil organic matter. Plant and Soil 241: 155-176.

Soil Survey Staff (2014) Keys to soil taxonomy. 12th Edition. Natural Resources Conservation Service, US Department of Agriculture. Washington DC, USA. 372P.

Torn MS, Trumbore SE, Chadwick OA, Vitousek PM, Hendricks DM (1997) Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. Nature 389: 170-173. https://doi.org/10.1038/38260

Turner BL (2021) Soil as an archetype of complexity: A systems approach to improve insights, learning, and management of coupled biogeochemical processes and environmental externalities. Soil Systems 5: 39. https://doi.org/10.3390/soilsystems5030039

USDA (2022) Keys to soil taxonomy. 13th Edition. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. Washington DC, USA. https://www.nrcs.usda.gov/. Fecha de consulta: 16 de febrero de 2026.

Valdés-Velarde E, Vázquez-Domínguez LP, Tinoco-Rueda JÁ, Sánchez-Hernández R, Salcedo-Pérez E, Lagunes-Fortiz E (2022) Servicio ecosistémico de carbono almacenado en cafetales bajo sombra en sistema agroforestal. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 13: 287-297.

Villafuerte-González RJ, Ortiz-Solorio CA, Gutiérrez-Castorena MC, García-Hernández J, Leyva-García G, Perales-Hoeffer L (2021) Propuesta metodológica para estudios etnoedafológicos en zonas con poca o nula actividad agrícola. Etnobiología 19: 63-80.

Walkley A, Black IA (1934) An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37: 29-38. https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003

Wiesmeier M, Urbanski L, Hobley E, Lang B, von-Lützow M, Marin-Spiotta E, van-Wesemael B, Rabot E, Ließ M, Garcia-Franco N, Wollschläger U, Vogel HJ, Kögel-Knabner I (2019) Soil organic carbon storage as a key function of soils. Geoderma 333: 143-153. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026

Zaro GC, Caramori PH, Yada-Junior GM, Sanquetta CR, Androcioli-Filho A, Nunes ALP, Prete CEC, Voroney P (2020) Carbon sequestration in an agroforestry system of coffee with rubber trees compared to open-grown coffee in southern Brazil. Agroforestry Systems 94: 799–809. https://doi.org/10.1007/s10457-019-00450-z

Zinck JA, Metternicht G, Bocco G, Del Valle H (2016) Geopedology. An integration of geomorphology and pedology for soils and landscape studies. Springer International Publishing. Cham, Suiza. 556P.