

Análisis Fisicoquímico del Suelo a Diversas Profundidades en un Sistema MIAF en Veracruz, México Physicochemical Analysis of the Soil at Various Depths in a MIAF System in Veracruz, Mexico

Ángel Capetillo-Burela¹, Catalino Jorge López-Collado^{1*}, Rigoberto Zetina-Lezama²,
David Jesús Palma-López³, Eusebio Ortega-Jiménez¹ y Gustavo López-Romero¹

¹ Colegio de Postgraduados Campus, Veracruz. Carretera Federal Xalapa-Veracruz, km 88.5, vía Paso de Ovejas entre las localidades de Puente Julia y Paso San Juan, Predio Tepetates. 91700 Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México; (A.C.B.), (C.J.L.C.), (E.O.J.), (G.L.R.).

* Autor para correspondencia: ljorge@colpos.mx

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)/Campo Experimental Cotaxtla. Carretera Federal Veracruz-Córdoba km 34.5. 94270 Medellín de Bravo, Veracruz, México; (R.Z.L.).

³ Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina s/n, km. 3, Periférico Carlos A Molina SN, Ranchería Río Seco y Montaña. 86500 Cárdenas, Tabasco, México; (D.J.P.L.).

RESUMEN

El Sistema Milpa Intercalada en Árboles Frutales implementado hace 22 años en la Región de Los Tuxtlas Veracruz por científicos del INIFAP y el Colegio de Postgraduados, han determinado que por cada kilogramo de maíz producido bajo ese sistema se pierden 0.5 kg de suelo por año; mientras que con el manejo convencional se pierden 35.5 kg de suelo por ha y por año. El objetivo fue describir e identificar el estado actual de las propiedades físicas y químicas del suelo (pH del suelo; Conductividad Eléctrica (CE); Materia orgánica (M.O.); Carbono Orgánico (C. O.); Textura; Capacidad de Campo (CC), y Liberación de Carbono (CO₂) en profundidades de 0-30 cm, 30-60 cm, 60-100 cm, y testigo (labranza convencional + quema de residuos) en el módulo MIAF-INIFAP de Axochio, San Andrés Tuxtla, Ver. Se colectaron y procesaron 12 muestras de suelos, clasificadas en cuatro tratamientos, y analizadas bajo un diseño estadístico de bloques completamente al azar con tres repeticiones (T1= 0 - 30 cm; T2= 30-60 cm; T3= 60-100 cm y T4= Testigo (Labranza convencional + Quema de residuos)). Se encontraron diferencias estadísticas significativas en las variables M.O., C.O., y pH; mientras que, en la CE., y CC, no se encontraron diferencias significativas. La textura fue Arcilloso para el Tratamiento 1, 2 y 4; así como arcillo limoso para el tratamiento 3. La mayor liberación de CO₂ fue para el tratamiento 1, con un acumulado a los 28 días de 1065.66 kg de CO₂ por hectárea, seguido del tratamiento 2, 3 y 4 con 962.44, 944.11 y 926.13 kg ha⁻¹. Se concluye que existe un comportamiento diferenciado de las profundidades del suelo, por lo que cada profundidad debe ser manejada de forma diferente con respecto al manejo que se tiene en monocultivos de ciclo anual en esa región.

Palabras clave: area de cultivo, CO₂ frutal, maíz, materia orgánica.

SUMMARY

The Milpa Intercropped with Fruit Trees system, implemented 22 years ago in the Los Tuxtlas region of Veracruz by scientists from INIFAP and the Colegio de Postgraduados, has determined that for every kilogram of maize produced under this system, 0.5 kg of soil is lost per year, whereas under conventional management, 35.5 kg of soil are lost per hectare per year. The objective of this study was to describe and identify the current status of soil physical and chemical properties (soil pH, electrical conductivity [EC], organic matter [OM], organic carbon [OC], texture, field capacity [FC], and carbon release [CO₂]) at depths of 0-30 cm, 30-60 cm, and 60-100 cm,



Cita recomendada:

Capetillo-Burela, A., López-Collado, C. J., Zetina-Lezama, R., Palma-López, D. J., Ortega-Jimenez, & López-Romero, G. (2026). Análisis Fisicoquímico del Suelo a Diversas Profundidades en un Sistema MIAF en Veracruz, México. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-9. e2386. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2386>

Recibido: 14 de agosto de 2025.
Aceptado: 16 de octubre de 2025.
Artículo. Volumen 44.
Febrero de 2026.

Editor de Sección:
Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar

Editor Técnico:
Dr. José Gregorio Joya Dávila



Copyright: © 2026 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

including a control treatment (conventional tillage + residue burning) in the MIAF-INIFAP module of Axochio, San Andrés Tuxtla, Veracruz. Twelve soil samples were collected, processed, classified into four treatments, and analysed under a completely randomized block design with three replications (T1 = 0-30 cm; T2 = 30-60 cm; T3 = 60-100 cm; T4 = control [conventional tillage + residue burning]). Statistically significant differences were found in OM, OC, and pH, whereas no significant differences were observed in EC and FC. Texture was clayey in Treatments 1, 2, and 4, and silty clay in Treatment 3. The greatest CO₂ release occurred in Treatment 1, with a cumulative 28-day CO₂ release of 1065.66 kg ha⁻¹, followed by Treatments 2, 3, and 4 with 962.44, 944.11, and 926.13 kg ha⁻¹, respectively. It is concluded that soil depth exhibits differentiated behavior; therefore, each depth should be managed differently compared with the management practices applied in annual monocultures in the region.

Index words: crop area, CO₂, fruity, maize, organic matter.

INTRODUCCIÓN

El Sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) es una práctica agroecológica que combina cultivos básicos (maíz, frijol y calabaza) con árboles frutales en un mismo terreno, además que favorece la conservación del suelo, biodiversidad y resiliencia socioecológica, integrando funciones ambientales, económicas y sociales. En este sentido, el maíz (*Zea mays* L.) aporta el grano básico para la alimentación y estructura vertical que favorece la asociación con otras especies; el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) contribuye con fijación biológica de nitrógeno, mejorando la fertilidad del suelo y ofreciendo proteína vegetal, y finalmente el árbol frutal brinda sombra parcial, diversificación productiva y protección del suelo, fortaleciendo la sustentabilidad del Sistema. En el año 2003, en la localidad de Axochío, municipio de San Andrés Tuxtla, Veracruz, fue establecido un sistema MIAF, denominado actualmente "Módulo de Investigación y Transferencia de Tecnologías Productivo Conservacionistas Dr. Antonio Turrent Fernández", comúnmente llamado Modulo MIAF-INIFAP, el cual ha sido desde esos años y hasta la actualidad el eje central para diversas investigaciones en nuestro país, enfocadas a la conservación del recurso suelo y agua en terrenos de laderas (INIFAP, 2023). Este sistema busca rescatar los elementos centrales del paradigma de la "milpa", adjuntándole elementos del conocimiento agronómico clásico, debido que integra principios y componentes para controlar la erosión de suelos, mejorar su calidad, y se admite que constituye una alternativa viable para contribuir a mejorar el ingreso de las pequeñas unidades de producción (Francisco, Zambada, Turrent, Cortés y Becerra, 2010). El propósito de estudiar las propiedades físicas y químicas de los suelos en un sistema MIAF, es fundamental para comprender su impacto, optimizar el manejo de los recursos naturales y mejorar la productividad sin comprometer la fertilidad del suelo; por lo que la integración de árboles frutales en la milpa puede influir en la disponibilidad de nutrientes y en la estructura del suelo, lo que hace esencial su estudio (Altieri y Nicholls, 2013; Altieri *et al.*, 2021). Por otro lado, investigaciones realizadas por Arriaga-Vázquez *et al.* (2020); Romero-Figueiras *et al.* (2024), quienes evaluaron el impacto del sistema MIAF en las propiedades químicas y biológicas del suelo, comparándolo con sistemas de manejo agrícola tradicional y de labranza de conservación, encontraron que el sistema MIAF mejoró la actividad metabólica de grupos funcionales de microorganismos en la zona de recepción y filtro de sedimentos, en comparación con la zona media y donadora de sedimentos del MIAF y con los sistemas de agricultura tradicional y labranza de conservación. Asimismo, México ocupa el décimo segundo lugar como emisor de gases de efecto invernadero con una emisión calculada en 467.3 millones de toneladas de CO₂ que representa 1.56 % de la contribución mundial y 4.4 millones de toneladas de CO₂ (Solís-Correa, 2015). El carbono (C) del CO₂ es importante ya que las plantas sin C no podrían realizar la fotosíntesis (Raven, Johnson y Losos, 2014). La pérdida de la fertilidad y biodiversidad del suelo están directamente relacionadas con la pérdida de carbono natural, según estimaciones, ya se ha perdido el 80% del C en el suelo de áreas con una gran producción agrícola debido al arado destructivo, el pastoreo excesivo y, el uso de fertilizantes y pesticidas químicos que reducen los niveles de C; es decir, las existencias de carbono en el suelo pueden ser significativas y los cambios en las existencias pueden producirse juntamente con los ocurridos en las propiedades del suelo y en las prácticas de gestión, incluyendo tipo y rotación de cultivos, labranza, drenaje, gestión de desechos y agregados orgánicos. La importancia del estudio de la captura del C se debe a su papel fundamental en la nutrición de los cultivos, incrementando el rendimiento de las unidades de producción (IPCC, 2021).

Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue describir el estado actual de las propiedades físicas y químicas del suelo en diferentes profundidades en el modulo MIAF-INIFAP de Axochio, San Andrés Tuxtla, Ver., para tomarlos como base en el manejo y producción de cultivos anuales y perennes en este tipo de sistemas agrícolas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. Las muestras de suelos fueron colectadas en el Modulo MIAF denominado "Módulo de Investigación y Transferencia de Tecnologías Productivo Conservacionistas Dr. Antonio Turrent Fernández" (Modulo MIAF-INIFAP), el cual se encuentra en la localidad de Axochio, municipio de San Andrés Tuxtla, Veracruz, ubicado geográficamente a los 18° 20' 0.5" N y 95° 17' 57.7" O, y una altitud de 60 m. La región de Los Tuxtlas, Ver., se caracteriza por poseer un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw2) y la precipitación está entre las isoyetas 1500 a 2000 mm (García, 2004).

Colecta y preparación de las muestras de suelos. En octubre de 2024 se colectaron 12 muestras de suelo a diferentes profundidades, clasificadas y ordenadas por tratamientos según el Cuadro 1. De septiembre de 2024 a enero de 2025 fueron procesadas y analizadas bajo un diseño de bloques completamente al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones, para controlar la variabilidad, reducir el error experimental y dar validez a los resultados. Las muestras se secaron 10 días en charolas de aluminio codificadas, se trituraron, molieron y tamizaron (tamiz núm. 10) para su análisis en laboratorio con el método AS-01 de la NOM-021-RECNAT-2000 (2002). El procesamiento se realizó en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas del Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz, en Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México.

Variables Respuesta

Potencial de Hidrógeno (pH) del suelo. Fue determinado en agua por el método AS-02 de la NOM-021-RECNAT-2000 (2002), con un potenciómetro manual con una relación 1:2 (20 gramos de suelo tamizado y 40 mL de agua destilada). Conductividad eléctrica (CE). Se determinó con un conductímetro portátil modelo HI 98312 (Hanna Instruments) por el método de dilución, y fue reportada en deciSiemens por metro (dS m⁻¹). Materia orgánica (M.O.) y Carbono Orgánico (C. O.). Fueron determinados mediante el método AS-07 de la NOM-021-RECNAT-2000 (2002). Textura del suelo. Fue realiza por el método de Bouyoucos, (1927) mediante el método AS-09 de la NOM-021-RECNAT-2000 (2002). Capacidad de Campo (CC). Fue determinado mediante el método de la curva de retención en cada una de las muestras de suelos. Todas las propiedades físicas y químicas, se determinaron con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (2002).

Liberación de Carbono (CO₂). Esta variable fue determinada por el método de "Incubación estática-determinación por titulación" en el laboratorio de suelos, aguas y plantas (LABSAP) del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, México, la cual es una técnica que se utiliza para medir la tasa de descomposición anaeróbica de la materia orgánica del suelo y la liberación de CO₂, y se basa en el principio de que, en condiciones anaeróbicas, los microorganismos descomponen la materia orgánica a través de la fermentación, liberando el CO₂ como producto final (Alef y Nannipieri (1995); Anderson (1982). El procedimiento para esta variable fue el siguiente: Primeramente, se determinó la Capacidad de Campo en cada una de las muestras de suelos y repeticiones, con el fin de identificar la cantidad de agua requerida en esta variable; para ello, se pesaron por triplicado 100 g de suelo y se pusieron a saturación en vasos de precipitados y botes de plástico sin fondo que contenían una malla y papel filtro Whatman 42 para evitar el paso de las partículas de suelo. A las 24 h, se tomó el peso húmedo del mismo y por diferencias entre el peso seco se determinó la CC de cada muestra. Esta variable fue necesaria para poder identificar la cantidad de agua requerida para la muestra de 25 g de suelo que se sometería a incubación. El procedimiento de incubación consistió en introducir en un recipiente plástico con capacidad de 2 litros, un frasco de 50 mL con 25 g de suelo a capacidad de campo, un segundo frasco del mismo volumen con 25 mL de agua destilada, y un tercer frasco de 100 mL con 10 mililitros de hidróxido de sodio (NaOH) a 1N; al cual, en boca del frasco se le agregó cinta teflón para lograr con ello un cierre hermético para evitar la filtración de aire e intercambio de gases con el exterior. El NaOH sirve como "trampa" para capturar el CO₂ producido por los microorganismos en su respiración; mientras que el agua destilada es utilizada para mantener una humedad constante en el interior del frasco descrito anteriormente. Para determinar la cantidad de carbono liberado por los suelos, se realizaron las titulaciones al día 1, 3, 5, 7, 14 y 28 del inicio de la incubación; las cuales se llevaron a cabo con la utilización de una solución de ácido clorhídrico (HCL) al 0.5N en su titulación. El procedimiento consistió en sacar los vasos precipitados que contenían 10 mL de hidróxido de sodio (NaOH) a 1N, el cual fue titulado con HCl agregándole previamente tres gotas de fenolftaleína al 0.5%.

Cuadro 1. Número de tratamientos evaluados en esta investigación.
Table 1. Number of treatments evaluated in this research.

Tratamiento	Descripción
1	Área de cultivo para maíz y frijol 0 - 30 cm de profundidad
2	Área de cultivo para maíz y frijol 30 - 60 cm de profundidad
3	Área de cultivo para maíz y frijol 60 - 100 cm de profundidad
4	Testigo (Labranza convencional + Quema de residuos 0-30 cm (LC+Quema))

En este sentido es necesario mencionar que, al agregarle la fenoltaleína, el hidróxido de sodio cambia de color transparente a rosado, y después de la reacción se comienza a poner gota por gota de ácido clorhídrico (HCl) hasta que haga reacción y tome nuevamente su color transparente, registrando en ese cambio el consumo final del HCl. Con los datos de carbono liberado se determinó el mejor modelo que describiera la liberación de carbono por los suelos utilizando el software CurveExpert Professional Hyams (2023). El modelo matemático representativo que fue seleccionado para conocer la curva de liberación de C por los suelos fue un modelo de regresión polinomial de segundo grado, este modelo fue seleccionado dentro de los mejores modelos generados por el software antes mencionado que ajustó los datos de liberación de carbono del suelo. La selección del modelo se consideró con base en el más alto coeficiente de determinación (R^2) y el mínimo error estándar del modelo 1.

$$Y = a + b \cdot X + c \cdot X^2 \quad (1)$$

Donde el error estándar de la regresión polinomial de segundo grado es 0.0138, el coeficiente de correlación (r) es 0.95 y el coeficiente de determinación (r^2) es 0.91; Y representa los gramos de carbono capturado en hidróxido de sodio y X los días de incubación en el suelo.

Análisis estadístico. Los resultados de las variables antes mencionadas fueron analizados con el paquete estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2020); a los cuales, se le realizaron análisis de varianza (ANOVA), así como pruebas de comparación de medias mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0.05$), para identificar las diferencias significativas entre los tratamientos evaluados

RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 2 se presenta el análisis de varianza (ANOVA) de las variables de respuesta correspondientes a los cuatro tratamientos bajo un diseño de bloques completamente al azar. Se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para las variables materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO) y potencial de hidrógeno (pH); mientras que para conductividad eléctrica (CE) y capacidad de campo (CC) no se observaron diferencias estadísticas significativas.

Para el caso de la variable M.O se encontró a los 30 cm un 2.10%, mientras que a los 60 y 100 cm de profundidad el contenido fue de 0.95 y 1.05%, sin considerar al testigo que su contenido fue de 2.17% de M.O. En este sentido, Pulido-Esquivel, Prado, Buendía y García (2025) en una investigación enfocada en mejorar la fertilidad del suelo y retención de nutriente, encontraron un aumento significativo en el contenido de materia orgánica y nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) en los primeros 30 cm de profundidad, en comparación con sistemas de monocultivo, observando que a mayores profundidades (30-60 cm y 60-100 cm), se mantuvo una mayor estabilidad en la estructura del suelo debido a las raíces profundas de los árboles frutales. Estos resultados son similares a los encontrados en esta investigación, ya que el mayor contenido de M.O, se presentó en los primeros 30 cm de profundidad, observando que a mayor profundidad se tuvo un menor contenido de esta variable. Asimismo, Martínez-López *et al.* (2022) realizaron una investigación en el estado de Chiapas, México sobre el análisis de la distribución de la materia orgánica en suelos MIAF a diferentes profundidades, encontrando que la capa superficial (0-30 cm) tuvo un contenido de materia orgánica de 4.2%, asociado a la descomposición de hojas y ramas de los árboles frutales; mientras que en la capa de 30-60 cm, el contenido de materia orgánica fue de 2.8%, y finalmente en la capa de 60-100 cm se redujo a 1.5% en la misma variable; por lo que el sistema MIAF bajo esas condiciones, mostró una mayor retención de materia orgánica en comparación con sistemas de monocultivo, lo que sugiere una mejora en la calidad del suelo a largo plazo. Aunado a lo anterior, la investigación

realizada por Alanís-Rodríguez et al. (2018) enfocada a evaluar la dinámica de la materia orgánica en suelos tropicales bajo diferentes usos de la tierra, encontraron que la conversión de suelos de bosques a agricultura reduce significativamente el contenido de carbono orgánico del suelo y altera la composición de la materia orgánica, afectando su dinámica en los suelos evaluados.

Respecto a la variable carbono orgánico (C.O.), los resultados de esta investigación mostraron valores inferiores en función de la profundidad del suelo, con 1.2%, 0.553% y 0.607% para los estratos de 30, 60 y 100 cm, respectivamente, mientras que en el testigo se obtuvo 1.2%. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Martínez-López et al. (2022), quienes al evaluar la distribución vertical del C.O. en sistemas MIAF observaron una disminución con la profundidad. Dicho patrón se atribuye a la presencia de árboles frutales, cuya descomposición radicular y actividad microbiana favorecen una mayor acumulación de carbono en las capas subsuperficiales (30-60 cm y 60-100 cm). En este sentido, de igual manera Nicholls, Altieri y Vázquez (2015) al evaluar el impacto de los árboles frutales en el MIAF, encontraron que estos aumentan el contenido de carbono orgánico en el suelo, especialmente en la capa de 0-30 cm, debido a la caída de hojas y frutos, así como también una contribución significativa en capas más profundas (30-60 cm y 60-100 cm) debido al crecimiento de raíces profundas. Finalmente, Cuevas-Coeto, Vera y Cuevas (2019) al realizar una investigación comparativa en diversas profundidades de Carbono Orgánico en sistema MIAF, encontraron un 20-30% mayor en la capa superficial (0-30 cm) en comparación con monocultivos; mientras que en capas más profundas (30-60 cm y 60-100 cm), la diferencia es menor pero aún significativa.

Para el caso de la variable pH, se encontró que este fue de 6.12 para la profundidad del suelo de 0-30, mientras que de 30-60 fue de 6.58 y de 60-100 cm fue de 6.68 respectivamente; es decir, éste fue incrementando con respecto a las profundidades evaluadas. En este sentido, Martínez-López et al. (2022) al estudiar la variación del pH de un sistema MIAF en la zona centro del estado de Veracruz, encontraron que éste varió significativamente con la profundidad, ya que de 0-30 cm, el pH fue ligeramente ácido (6.2), debido a la acumulación de materia orgánica y la actividad biológica en la capa superficial; mientras que de 30-60 cm, el pH aumentó a 6.5, indicando una menor influencia de los residuos orgánicos y a profundidad de 60-100 cm, el pH fue de 6.8, mostrando un suelo más neutro, lo que sugiere una menor alteración por prácticas agrícolas y una mayor influencia de los minerales del subsuelo. Asimismo, Martínez-Aguilar et al. (2020) al evaluar el efecto de la profundidad sobre el pH en un sistema MIAF en la Frailesca, Chiapas, México, encontraron que éste disminuyó con la profundidad, ya que a profundidad de 0-30 cm, el pH fue de 6.0, reflejando la influencia de la materia orgánica y los insumos orgánicos aplicados; mientras que de 30-60 cm, el pH fue de 5.8, mostrando una ligera acidificación y finalmente de 60-100 cm, el pH fue de 5.5, lo que indica un suelo más ácido en las capas profundas, posiblemente debido a la lixiviación de nutrientes y la menor actividad biológica.

Respecto a la variable CE, se encontró que esta fue de 0.24 dS m⁻¹ para la profundidad de 0-30 cm, 0.18 dS m⁻¹ de 30-60 cm y de 0.14 dS m⁻¹ de 60-100 cm respectivamente; mientras que la CE de 0.24 dS m⁻¹ fue para el testigo (Tratamiento 4) que corresponde a la Labranza convencional+Quema de residuos. Derivado de lo anterior, investigaciones realizadas por Arriaga-Vázquez et al. (2020) en una investigación ejecutada en sobre las propiedades químicas y biológicas de suelos en un sistema MIAF a tres profundidades (0-30, 30-60 y 60-100 cm) encontrando lo siguiente: a) La C.E., en la capa superficial (0-30 cm) fue de 1.8 dS m⁻¹, asociada a la alta actividad

Cuadro 2. Cuadrados medios y significancia estadística detectada en las variables M.O., C. O., pH, CE, y CC en muestras de suelos del sistema MIAF. Axochio, San Andrés Tuxtla, Veracruz.

Table 2. Mean Square and significance detected in the variables M.O., C.O., pH, EC, and CC in soil samples from the Axochio MIAF system in San Andrés Tuxtla, Veracruz.

Fuente de variación	GL	M.O.	C. O.	pH	CE	CC
Tratamiento	3	1.29*	0.43*	0.58*	0.01 ns	5.21 ns
Bloques	2	0.29	0.10	0.30	1.1 × 10 ⁻⁴	0.76
Error	6	0.13	0.04	.01	1.4 × 10 ⁻³	1.18
Total	11	-	-	-	-	-
CV (%)		22.61	22.60	1.94	19.01	2.79

GL = grados de libertad; M.O. = materia orgánica; C.O. = carbono orgánico; pH = potencial de hidrógeno; CE = conductividad eléctrica; CC = capacidad de campo; CV = coeficiente de variación; ns = no significativo; * = indica significancia estadística ($p < 0.05$).

GL = degrees of freedom; O.M. = organic matter; O.C. = organic carbon; pH = hydrogen potential; EC = electrical conductivity; CC = field capacity; CV = coefficient of variation; ns = not significant; * = indicates statistical significance ($p < 0.05$).

microbiana y la descomposición de residuos orgánicos; b) En la capa intermedia (30-60 cm), la C.E., fue de 1.2 dS m^{-1} , mostrando una reducción significativa debido a la lixiviación de nutrientes, y c) En la capa más profunda (60-100 cm), la C.E., fue de 0.6 dS m^{-1} , lo que indica una menor influencia de los procesos superficiales. Asimismo, Martínez-López *et al.* (2022), en un estudio realizado en Veracruz, México, se evaluó la conductividad eléctrica del suelo en un sistema MIAF a tres profundidades (0-30, 30-60 y 60-100 cm), encontrando que la CE fue más alta en la capa superficial (0-30 cm), con un valor promedio de 2.1 dS m^{-1} , debido a la mayor concentración de nutrientes y materia orgánica; mientras que en la capa intermedia (30-60 cm), la CE disminuyó a 1.4 dS m^{-1} , lo que sugiere una menor acumulación de sales y nutrientes, y en la capa más profunda (60-100 cm), la CE fue la más baja, con un valor de 0.8 dS m^{-1} , indicando una menor actividad biológica y química. Estos resultados coinciden con los encontrados en esta investigación, en la cual la CE fue de 0.24 para la profundidad de 0-30 cm, 0.18 dS m^{-1} para la profundidad de 30-60 cm y de 0.14 dS m^{-1} en la profundidad de 60-100 cm respectivamente; mientras que la CE de 0.24 dS m^{-1} fue para el testigo (Tratamiento 4) que corresponde a la Labranza convencional+Quema de residuos.

En lo que respecta a la variable CC, se encontró que esta fue inferior a 40% en todos los tratamientos, la cual es un indicador de la capacidad de retener una gran cantidad de agua entre los macros y microporos de los agregados del suelo. En este sentido, investigaciones realizadas por Pulido-Esquivel *et al.* (2025) encontraron y demostraron que la presencia de árboles frutales en el sistema MIAF, mejoró la capacidad de campo del suelo al aumentar la infiltración de agua y reducir la escorrentía superficial; ya que los árboles frutales contribuyen a la formación de materia orgánica, lo que incrementa la porosidad del suelo y su capacidad para retener agua. Un segundo estudio realizado por Arriaga-Vázquez *et al.* (2020) en el cual compararon la variable capacidad de campo en MIAF vs monocultivo, lograron encontrar que los suelos bajo el sistema MIAF tienen una capacidad de campo significativamente mayor que los suelos bajo monocultivo, lo cual se debe a la mayor infiltración de agua y la reducción de la compactación del suelo. Asimismo, Cadena-Iñiguez *et al.* (2015), realizaron una investigación sobre la variación en las propiedades físicas y del suelo en Veracruz, México, encontrando que los sistemas MIAF mejoraron la infiltración de agua y redujeron la compactación del suelo en comparación con sistemas tradicionales; asimismo, también se encontró que la porosidad del suelo fue mayor en los primeros 30 cm, con mejoras significativas en las capas más profundas (30-60 cm y 60-100 cm) debido a la actividad radicular de los árboles. Estos resultados son similares a los encontrados en esta investigación en la variable Capacidad de Campo, ya que esta fue inferior a 40% en todos los tratamientos, la cual es un indicador de la capacidad de retener una gran cantidad de agua entre los macros y microporos de los agregados del suelo.

Con respecto a la variable textura, se encontró que para el Tratamiento 1, 2 y 4 ésta fue de tipo Arcilloso; mientras que para la profundidad de 60-100 cm (Tratamiento 3), la textura fue arcillo Limoso. Respecto a esta variable, estudios realizados Arriaga-Vázquez *et al.* (2020) en un estudio en el cual evaluaron la textura del suelo a profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm en un sistema MIAF, encontraron que ésta varió significativamente con la profundidad, ya que en la capa superficial (0-20 cm), predominó la textura franco-arcillosa, mientras que en las capas más profundas (40-60 cm) se observó un aumento en el contenido de arcilla, lo que sugiere una mejor retención de humedad en las capas inferiores. Asimismo, Ordóñez-Ovalle, Gómez, Soto y González (2022), realizaron una investigación sobre el impacto del sistema MIAF en la Textura del suelo en Colombia a profundidades de 0-15 cm, 15-30 cm y 30-50 cm, encontrando que la textura del suelo en la capa superficial (0-15 cm) fue franco-arenosa, mientras que en las capas más profundas (30-50 cm) se observó una textura franco-arcillosa; lo cual indicó que el sistema MIAF contribuye a la estabilidad del suelo y a la reducción de la erosión en las capas superficiales. En este sentido, Alanís-Rodríguez *et al.* (2018) evaluaron la variación de la textura del suelo en un sistema MIAF en Brasil a profundidades de 0-10 cm, 10-30 cm y 30-60 cm, encontrando que en la capa superficial (0-10 cm) fue franco-limosa, mientras que en las capas más profundas (30-60 cm) predominó la textura arcillosa, por lo que estos autores sugieren que el sistema MIAF mejora la estructura del suelo y favorece la infiltración de agua en las capas más profundas. Asimismo, Cuevas-Coeto *et al.* (2019) realizaron un estudio referente a la estabilidad de la estructura del suelo en un sistema MIAF en Oaxaca, en el cual encontraron que la estabilidad de los agregados del suelo fue mayor en las capas superficiales (0-30 cm) debido a la presencia de materia orgánica; sin embargo, también se observó una mejora en la estructura del suelo en las capas más profundas (30-60 cm y 60-100 cm), lo que se atribuyó a la actividad biológica y la descomposición de raíces. Ambas investigaciones demuestran que el sistema MIAF puede tener un impacto positivo en las propiedades físicas y químicas del suelo, aunque se requiere más investigación específica para comprender completamente su influencia en la textura del suelo (López-Teloxa y Monterroso-Rivas 2020).

Respeto a la variable captura de CO_2 , se encontró que el Tratamiento 1 fue el que más liberó carbono acumulado a los 28 días con 1065.66 kg de CO_2 por hectárea, seguido del Tratamiento 2, 3 y 4 con 962.44, 944.11 y 926.13 kg ha^{-1} , respectivamente (Figura 1). En este sentido, en los Tratamientos 2, 3 y 4 no se muestran diferencias sobresalientes con respecto al Tratamiento 1, que presentó la mayor liberación de CO_2 a los 28 días de incubación. Estos resultados se relacionan con el contenido de materia orgánica (M.O.), el cual presentó valores de 2.10, 0.95 y 1.05 % en los tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente, evidenciando una correlación entre ambas variables. Asimismo, como se muestra en la Figura 1, la liberación de CO_2 aumentó significativamente en todos los tratamientos a partir del séptimo día y hasta el final de la incubación, probablemente en respuesta a la concentración de M.O. y carbono orgánico (C. O.) presente en los suelos analizados.

En este contexto, la relevancia de este tipo de investigaciones radica en analizar el ciclo global del carbono y su impacto en la nutrición de los cultivos y la conservación del suelo; por lo que diversos estudios, descritos en los párrafos siguientes, destacan el papel de los suelos tropicales en dicho ciclo y cómo factores como la temperatura, la humedad, la deforestación y el manejo del suelo influyen en la liberación de CO_2 .

En este sentido, en la presente investigación se encontró que la mayor cantidad de CO_2 liberado fue para los suelos analizados en una profundidad de 0-30 cm, seguido de la profundidad de 30-60 y de 60 a 100 cm respectivamente (Figura 2). Investigaciones realizadas por Davidson, Janssens y Luo (2006), realizaron un estudio sobre la liberación del CO_2 en suelos tropicales y su relación con la temperatura y humedad, en el cual encontraron que la liberación de CO_2 está fuertemente influenciada por la temperatura y la humedad del suelo; es decir, cuando se presentan estas condiciones la actividad microbiana aumenta, lo que acelera la descomposición de la materia orgánica y la liberación de CO_2 . Soto-Pinto, Anzueto, Mendoza, Jiménez y de Jong (2010) realizaron una investigación sobre la dinámica de emisiones de CO_2 del suelo en un sistema MIAF en comunidades indígenas del estado de Chiapas, México a tres profundidades (0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm) utilizando cámaras de infrarrojos; en la cual, encontraron que la mayor liberación de CO_2 ocurrió en la capa superficial (0-10 cm), con una disminución significativa a mayores profundidades, atribuyendo a esos resultados la presencia de una mayor actividad microbiana, así como la existencia de raíces finas en la capa superficial. Asimismo, García-Ruiz, López, Martínez y Pérez (2020) en su investigación analizaron la liberación de CO_2 a diferentes profundidades (0-15 cm, 15-30 cm y 30-45 cm) en un sistema MIAF en el estado de Puebla, México, en el cual sus resultados fueron que la liberación de CO_2 disminuyó con la profundidad, pero se observó un pico significativo en la capa de 15-30 cm debido a la descomposición de materia orgánica acumulada, destacando la importancia de la gestión del suelo para reducir las emisiones de CO_2 . Pérez-Salinas et al. (2019), realizaron un estudio para evaluar la relación entre la profundidad del suelo (0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm) y la humedad del suelo en la liberación de CO_2 en un sistema MIAF en el estado de Oaxaca, México, encontrando que las emisiones de CO_2 fueron mayores en la capa superficial (0-20 cm) y disminuyeron con la profundidad; asimismo, se encontró una correlación positiva entre la humedad del suelo y la liberación de CO_2 en todas las profundidades. Por otro lado, Crowther et al. (2016), mencionan en su investigación que el impacto del cambio climático influye directamente en la liberación de CO_2 en suelos tropicales; es decir, el aumento de las temperaturas globales podría acelerar la liberación de CO_2 en estos tipos de suelos, lo que generaría un ciclo de retroalimentación positiva que exacerbaría el calentamiento global.

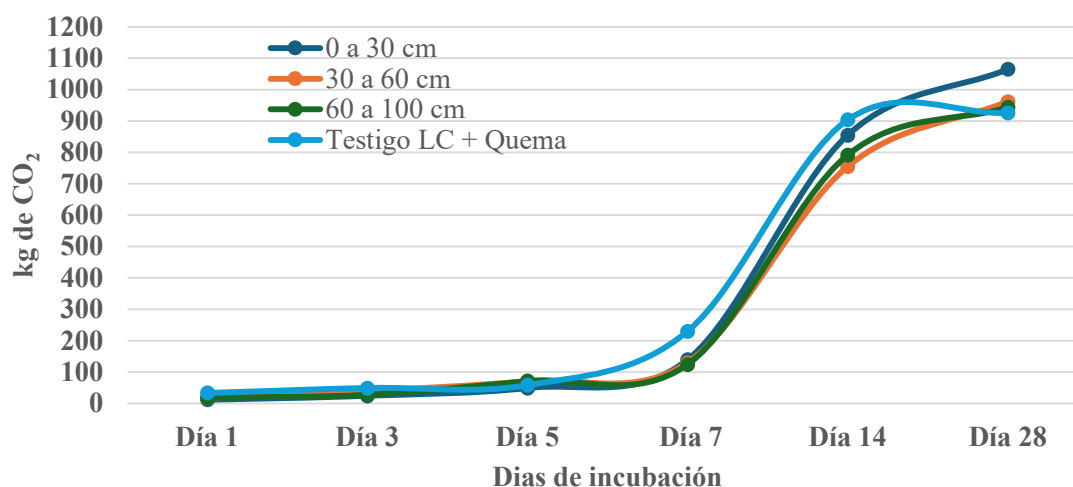


Figura 1. Liberación de CO_2 (kg ha^{-1}) en suelos del módulo MIAF de Axochio, San Andrés Tuxtla, Veracruz.
Figure 1. CO_2 release (kg ha^{-1}) in soils of the MIAF module in Axochio, San Andrés Tuxtla, Veracruz.

CONCLUSIONES

La investigación evidenció que las propiedades físicas y químicas del suelo en diferentes profundidades son determinantes para el establecimiento y productividad de cultivos anuales y frutales en el sistema MIAF. Esto exige un manejo agronómico diferenciado y adaptado a la variabilidad del suelo para optimizar la eficiencia y sostenibilidad del sistema. Además, la mayor liberación de CO₂ en los primeros 30 cm confirma el impacto positivo del MIAF en la acumulación y dinámica de la materia orgánica y el carbono orgánico.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados y analizados durante el presente estudio están disponibles a través del autor correspondiente, previa solicitud razonable.

CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

FINANCIAMIENTO

Se agradece al Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, así como al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por el apoyo económico y en especie proporcionado por ambas instituciones para el desarrollo de la investigación.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Metodología: C.J.L.C.; Análisis formal: A.C.B.; Investigación (trabajo de campo): A.C.B., R.Z.L., E.O.J. y G.L.R.; Análisis de laboratorio: C.J.L.C. y G.L.R.; Interpretación de resultados: R.Z.L.; Recursos (reactivos para análisis de laboratorio): D.J.P.L.; Escritura - preparación del borrador original: A.C.B.; Escritura - resultados y discusión: D.J.P.L.; Escritura - introducción: R.Z.L.; Escritura - conclusiones: E.O.J.; Escritura - revisión y edición e integración del artículo: A.C.B., C.J.L.C. y G.L.R.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, así como al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)/Campo Experimental Cotaxtla por el apoyo económico y en especie proporcionado por ambas instituciones para el desarrollo de la investigación. Asimismo, a los integrantes de mi consejo particular por el apoyo proporcionado para el desarrollo de esta investigación; así como también al Sr. Luis Nieto Castillo, Técnico del INIFAP por el apoyo en campo, a las técnicas M. C. Luz del Carmen Rivera Vázquez, M. C. Tania Isabel Vidaña Reyes y Angel Fernando Capetillo Hernandez, por su apoyo en las actividades de campo y laboratorio.

LITERATURA CITADA

Alanís-Rodríguez, E., Valdecantos-Dema, A., Canizales-Velázquez, P. A., Collantes Chávez-Costa, A., Rubio-Camacho, E., & Mora-Olivo, A. (2018). Análisis estructural de un área agroforestal en una porción del matorral xerófilo del noreste de México. *Acta Botánica Mexicana*, 125, e1329. <https://doi.org/10.21829/abm125.2018.1329>

- Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. London, United Kingdom: Academic Press.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2013). Agroecología y resiliencia al cambio climático: principios y consideraciones metodológicas. *Agroecología*, 8(1), 7-20.
- Altieri, M., Nicholls, C. I., Astier, M., Vásquez, L., Henao, A., & Infante, A. (2021). Documentando la evidencia en Agroecología: Una perspectiva Latinoamericana. *Boletín Científico*, 5, 1-83
- Anderson, J. P. E. (1982). Soil respiration. En A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.). *Methods of soil analysis, part 2: Chemical and microbiological properties* (pp. 831-871). Madison, WI, USA: ASA-SSSA.
- Arriaga-Vázquez, A. M., Martínez-Menez, M. R., Rubiños-Panta, J. E., Fernández-Reynoso, D. S., Delgadillo-Martínez, J., & Vázquez-Alarcón, A. (2020). Propiedades químicas y biológicas de los suelos en milpa intercalada con árboles frutales. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 465-474. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.599>
- Bouyoucos, G. J. (1927). The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. *Soil Science*, 23(5), 343-354.
- Cadena-Iñiguez, P., Camas-Gómez, R., Rodríguez-Hernández, F., Berdugo-Rejón, J. G., Ayala-Sánchez, A., & Salinas-Cruz, E. (2015). Contribuciones del INIFAP al extensionismo en México y la gestión de la innovación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(4), 883-895.
- Cuevas-Coeto, A., Vera-Castillo, Y. B., & Cuevas-Sánchez, J. A. (2019). Resiliencia y sostenibilidad de agroecosistemas tradicionales de México: Totonacapan. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(1), 165-175. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.1789>
- Crowther, T. W., Todd-Brown, K. E., Rowe, C. W., Wieder, W. R., Carey, J. C., Machmuller, M. B., ... & Bradford, M. A. (2016). Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*, 540(7631), 104-108. <https://doi.org/10.1038/nature20150>
- Davidson, E. A., Janssens, I. A., & Luo, Y. (2006). On the variability of respiration in terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 12(2), 154-164. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L. A., Tablada, E. M., & Robledo, C. W. (2020). *InfoStat versión 2020*. software estadístico. Córdoba, Argentina: Grupo InfoStat.
- Francisco, N. N., Zambada, M. A., Turrent, F. A., Cortés, F. J. I., & Becerra, E. N. L. (2010). *El sistema agroforestal milpa intercalada en árboles frutales: innovación para el pequeño productor de laderas*. Mexico: INIFAP.
- García, E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Distrito Fedral, México: Instituto de Geografía, UNAM.
- García-Ruiz, R., López-Báez, W., Martínez-Salinas, M. A., & Pérez-Olvera, A. (2020). Impacto de la profundidad del suelo en la liberación de CO₂ en sistemas MIAF. *Agrociencia*, 54(3), 421-433. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v54i3.2145>
- Hyams, D. G. (2023). *CurveExpert Professional* (Version 2.7.0) [Software]. <https://www.curveexpert.net>
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) (2023). Módulo de Investigación y Transferencia de Tecnologías Productivo Conservacionistas Dr. Antonio Turrent Fernández (Modulo MIAF-INIFAP). Consultado el 5 de febrero, 2023, desde <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/miaf-un-sistema-multiobjetivo>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- López-Teloxa, L. C., & Monterroso-Rivas, A. I. (2020). Soil respiration in an agrosilvopastoral system in central Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(2), 1-15. <https://doi.org/10.56369/tsaes.3202>
- Martínez-Aguilar, F. B., Guevara-Hernández, F., Aguilar-Jiménez, C. E., Rodríguez-Larramendi, L. A., Reyes-Sosa, M. B., & La O-Arias, M. A. (2020). Physico-chemical and biological characteristics of the soil cultivated with maize in conventional, agroecological and mixed systems in the Frailesca, Chiapas. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 793-806. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.793>
- Marínez-López, A., Cruz-León, A., Sangerman-Jarquín, D. M., Díaz-Cárdenas, S., Cervantes-Herrera, J., & Ramírez-Valverde, B. (2022). Prevalencia de los saberes tradicionales en las unidades de producción de café de la región Huatusco, Veracruz, México. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 5(1), 1172-1185. <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n1-090>
- Nicholls, C. I., Altieri, M. A., & Vázquez, L. L. (2015). Agroecología: Principios para la conversión y el rediseño de sistemas agrícolas. *Agroecología*, 10(1), 61-72.
- NOM-021-SEMARNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana). (2002). Antes NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. D. F.: SEGOB.
- Ordóñez-Ovalle, J., Gómez-Martínez, E., Soto-Pinto, L., & González-Santiago, M. V. (2022). El sistema milpa intercalado con árboles frutales (MIAF): evaluación agroecológica a diez años de su implementación en Chamula, Chiapas, México. *Campo-Territorio. Revista de Geografía Agraria*, 17(48), 109-136.
- Pérez-Salinas, J. E., Rodríguez, F. R., López-Santos, A., Torres-González, J. A., Meraz-Jiménez, A. D. J., Díaz-Romo, A., & Valdivia-Martínez, O. (2019). Erodabilidad y riesgo de erosión de suelos negros del centro de México: estudio de un Phaeozem. *Terra Latinoamericana*, 37(4), 391-400. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.531>
- Pulido-Esquivel, A. Y., Prado-Hernández, J. V., Buendía-Espinoza, J. C., & García-Núñez, R. M. (2025). Agroforestry Systems Enhance Soil Moisture Retention and Aquifer Recharge in a Semi-Arid Mexican Valley. *Water*, 17(10), 1488. <https://doi.org/10.3390/w17101488>
- Raven, P. H., Johnson, G. B., & Losos, J. B. (2014). *Biology* (10th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Romero-Figueiras, T., Andrés-Meza, P., Murguía-González, J., Espinosa-Calderón, A., Maldonado-Saavedra, O., & Leyva-Ovalle, O. R. (2024). El papel de los fertilizantes microbianos bajo un sistema de cultivo diversificado. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(3), 1-22. <https://doi.org/10.19136/era.a11n3.4007>
- Solís-Correa, K. C. (2015). Energía y gases de efecto invernadero (GEI). Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública (CESOP). Consultado el 5 de febrero, 2023, desde https://siiba.conadesuca.gob.mx/siiba/Consulta/verDoc.aspx?num=998&utm_
- Soto-Pinto, L., Anzueto, M., Mendoza, J., Jiménez-Ferrer, G. J., & de Jong, B. (2010). Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, México. *Agroforestry Systems*, 78(1), 39-51. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9247-5>