



Calidad de Suelo y Eficiencia Relativa de la Tierra en el Sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales Soil Quality and Relative land Efficiency in the Milpa System Intercropped with Fruit trees

Tabaré Duché-García^{1‡}^{ID}, Ignacio Ocampo-Fletes²^{ID}, Javier Cruz-Hernández²^{ID},
J. Arahón Hernández-Guzmán²^{ID}, Antonio Macías-López²^{ID},
Daniel Jiménez-García³^{ID} y Ernesto Hernández-Romero²^{ID}

¹ El Colegio de la Frontera Sur. Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n. Barrio María Auxiliadora. 29290 San Cristóbal de Las Casas, Chiapas; (T.D.G.).

[‡] Autor para correspondencia: tabaredg@gmail.com

² Colegio de Postgraduados, Campus Puebla. Boulevard Forjadores de Puebla Núm. 205, Santiago Momoxpan. 72760 San Pedro Cholula. Puebla, México; (I.O.F.), (J.C.H.), (J.A.H.G.), (A.M.L.), (E.H.R.).

³ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Instituto de Ciencias, Centro de Agroecología y Ambiente. Edificio Val. 1, km 1.7 carretera a San Baltazar Tetela, San Pedro Zacachimalpa. 72960 Puebla, Puebla, México; (D.J.G.).

RESUMEN

El Sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) es un sistema agroforestal multifuncional que busca aumentar la productividad en pequeñas unidades de producción (< 5 ha). En esta investigación se evaluaron atributos físicos, químicos y microbiológicos para determinar la calidad del suelo y su relación con la eficiencia relativa de la tierra (ERT) en un sistema MIAF. Se compararon 10 sitios en sistema MIAF y seis en monocultivo, en los ciclos de cultivo 2018 y 2019. En muestras compuestas de suelo se midieron atributos físicos, químicos y microbiológicos para calcular un índice de calidad de suelo (ICS) y se determinó la ERT. Se realizó análisis de varianza, prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) y análisis de componentes principales (ACP) para generar el ICS. Hubo diferencias en la densidad aparente, humedad gravimétrica, materia orgánica oxidable, materia orgánica total y nutrientes, con mayores valores en sistema MIAF. El Índice de Calidad de Suelo fue mayor en el sistema MIAF con asociación maíz-frijol mientras que densidad aparente, humedad gravimétrica, materia orgánica total y abundancia de actinomicetos fijadores de nitrógeno fueron los parámetros más importantes del ACP. La ERT mostró valores superiores a uno y no se correlacionó con el ICS o algún atributo del suelo. Los índices más relevantes para la calidad de suelo presentaron valores más altos en los sitios bajo sistema MIAF, comparados con aquellos obtenidos en monocultivos. No se observó correlación entre ICS y ERT.



Cita recomendada:

Duché-García, T., Ocampo-Fletes, I., Cruz-Hernández, J., Hernández-Guzmán, J. A., Macías-López, A., Jiménez-García, D., & Hernández-Romero, E. (2026). Calidad de Suelo y Eficiencia Relativa de la Tierra en el Sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-15. e2361. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.2361>

Recibido: 14 de julio de 2025.

Aceptado: 29 de septiembre de 2025.

Artículo. Volumen 44.

Enero de 2026.

Editor de Sección:
Dr. Héctor Estrada Medina

Editor Técnico:
Fernando López Valdez



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/>).

Palabras clave: agroforestería, manzano, MIAF, microorganismos edáficos, rendimiento.

SUMMARY

The Milpa system interspersed with fruit trees (MIFT) is a multifunctional agroforestry system that seeks to increase productivity in small production units (< 5 ha). This study evaluated physical, chemical, and microbiological attributes to determine soil quality and its relationship with relative land efficiency (ERT) in a MIAF system. Ten sites under the MIAF system and six under monoculture were compared during two growing seasons (2018-2019). In composite soil samples, physical, chemical, and microbiological attributes were measured to calculate a soil quality index (ICS), and ERT was determined. Analysis of variance (ANOVA), Tukey's test ($\alpha = 0.05$), and principal component analysis (PCA) were performed to generate the ICS. The results showed differences in bulk density, gravimetric moisture, oxidizable

organic matter, total organic matter, and nutrient content, with better values in the MIAF system. The ICS was higher in the MIAF system with the maize-bean association, with bulk density, gravimetric moisture, total organic matter, and the abundance of nitrogen-fixing actinomycetes being the most important parameters identified by the PCA. The ERT showed values greater than one and did not correlate with the ICS or with any individual soil attribute. The most relevant soil quality indices showed higher values at sites under the MIAF system compared with monoculture systems. However, no correlation was observed between the ICS and the ERT.

Index words: agroforestry, apple tree, MIAF, edaphic microorganisms, yields.

INTRODUCCIÓN

El sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) es una tecnología agroforestal consolidada que ha demostrado beneficios en la productividad y sostenibilidad de pequeñas unidades de producción (< 5 ha) (Juárez, Tuñón, Winton y Zapata, 2018; Cadena-Iñiguez, Camas, López, López y González, 2018). Fue concebido como una alternativa para la reconversión productiva en zonas de laderas con alta vulnerabilidad a la erosión, combinando la producción de alimentos básicos (maíz y frijol) con la de cultivos perennes de alto valor (árboles frutales) (Turrent *et al.*, 2017).

Su enfoque multi-objetivo no solo busca mejorar la seguridad alimentaria y los ingresos de los pequeños productores, sino también conservar los recursos naturales. Debido a sus múltiples beneficios socioeconómicos y ambientales, el MIAF fue adoptado como un componente clave del programa público "Sembrando Vida" durante el sexenio anterior, con el objetivo de impulsar el desarrollo rural y la autosuficiencia alimentaria en las comunidades más marginadas de México (Cortez-Egremy, Baca, Uribe-Gó, Gómez y Valdés, 2022).

Cadena-Iñiguez *et al.* (2018) estudiaron la capacidad del MIAF para reducir la erosión del suelo, especialmente en terrenos de ladera. Y Arriaga-Vázquez *et al.* (2020) evaluaron las propiedades químicas y biológicas, en un suelo de ladera en sistema MIAF. Sin embargo, los estudios sobre la calidad del suelo dentro de este sistema aún son limitados, especialmente en la relación entre atributos físicos, químicos y microbiológicos con la eficiencia relativa de la tierra (ERT).

Si bien el MIAF fue ampliamente adoptado en diversas regiones de México (Ocampo y Urbina, 2017; Pillado-Albarrán, Albino, Santiago y Pedraza, 2023), su impacto en la calidad del suelo necesita una evaluación más precisa mediante indicadores que permitan una comparación objetiva con sistemas convencionales de monocultivo. Para ello, el uso de índices de calidad de suelo (ICS) surgió como una herramienta clave en la evaluación de agroecosistemas (Barrera-León, Barrezueta y García, 2020), permitiendo integrar múltiples variables en un solo parámetro cuantificable (Afanador-Barajas *et al.*, 2020; Castillo-Valdez, Etchevers, Hidalgo y Aguirre, 2021).

Por otro lado, la ERT se utilizó en estudios previos, para medir la eficiencia del uso de la tierra en sistemas de cultivo múltiple (Albino *et al.*, 2016), pero su relación con la calidad del suelo no se determinó de manera concluyente. Investigaciones previas reportaron valores de ERT mayores a uno en sistemas agroforestales, lo que indica una ventaja en términos de rendimiento por unidad de superficie (Muñoz-Ruiz, Santiago, Albino y Rivera, 2018). Sin embargo, es necesario validar si la calidad del suelo contribuye a estos valores o si existen otros factores que explican la productividad del sistema (Navarro-Bravo, Figueroa, Martínez, González y Osuna, 2008).

Este estudio tiene como objetivo analizar y evaluar la calidad del suelo en el sistema MIAF mediante un índice de calidad de suelo (ICS) y determinar su relación con la eficiencia relativa de la tierra (ERT).

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en los ciclos de cultivo 2018 y 2019 en una parcela que en 2004 se estableció bajo el sistema MIAF, en terreno de un productor cooperante ubicado en San Mateo Capultitlán, municipio de Huejotzingo, Puebla, en las coordenadas 19° 12' 12.2" N y 98° 25' 38.6" O, altitud de 2260 m y suelo tipo fluvisol, de acuerdo con el sistema de referencia WRB (Ascencio-López *et al.*, 2018). El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano [C(w)], con precipitación anual de 900-1100 mm (INAFED, 2016).

El sitio experimental tuvo una superficie de un tercio de hectárea y un patrón de cultivo maíz-frijol asociados e intercalado con manzanos. En 2010 se implementó un experimento, en el cual se estudió la asociación maíz (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), intercalada con árboles de manzano (*Malus domestica* Borkh) cv "agua nueva dos" en plena producción, conducidos en sistema Tatura modificado. Los árboles estuvieron distribuidos en cuatro hileras de 50 árboles cada una, separadas por franjas de 14.5 m destinados a los cultivos anuales. Se ocuparon dos tercios de la superficie para la asociación maíz-frijol y un tercio para manzanos. La densidad de población de maíz fue de 50 000 plantas ha⁻¹, del frijol 12 500 y 25 000 plantas ha⁻¹ y del frutal 694 plantas ha⁻¹. La siembra de maíz en monocultivo contó con una densidad de población de 60 000 plantas ha⁻¹ (Figura 1).

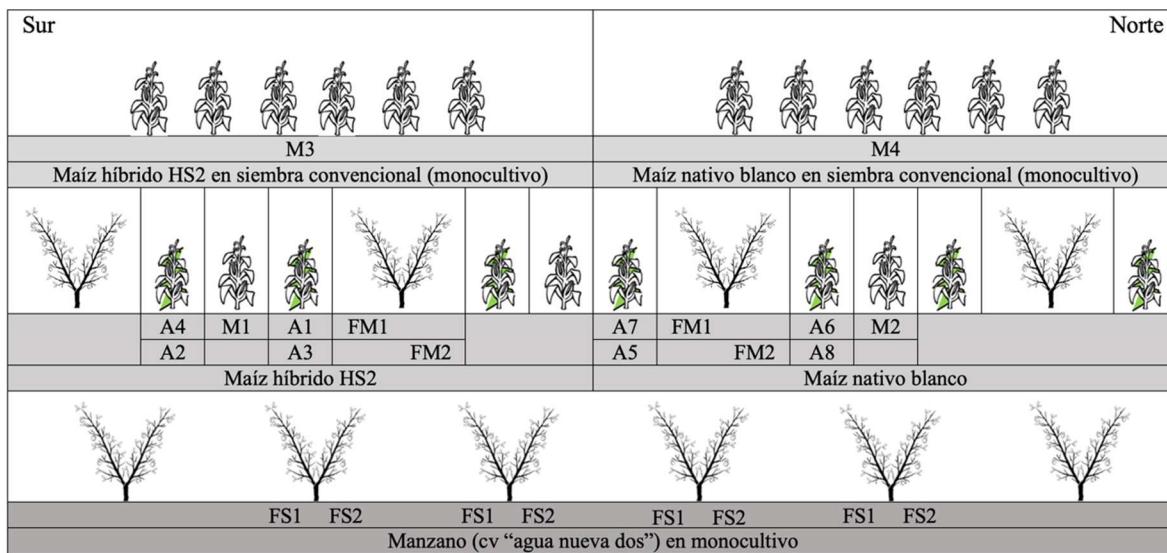


Figura 1. Distribución de los sitios de muestreo evaluados en el sistema MIAF y monocultivo. Elaboración propia.

Se muestran los 16 sitios de muestreo. A continuación, se explican las claves de los sitios, A = sitio con asociación maíz-frijol en MIAF; número impar/par = orientación sur/norte respecto a la hilera del árbol, en sitios con asociación él número impar/par también representa la densidad de población de frijol de 12 500/25 000 plantas ha^{-1} respectivamente; FM = árbol frutal en MIAF; FS = árbol frutal en monocultivo; M = maíz en monocultivo, no aplica orientación respecto a la hilera del árbol al ser monocultivo.

Figure 1. Distribution of the sampling sites evaluated in the MIAF system and monoculture. Source: Own elaboration.

The 16 sampling sites are shown. The site codes are explained below, A = site with maize-bean association in MIAF; Odd/even number = south/north orientation relative to the tree row (in sites with association, the odd/even number also represents the bean population density of 12 500/25 000 plants ha^{-1} , respectively); FM = fruit tree in MIAF; FS = fruit tree in monoculture; M = maize in monoculture (orientation relative to the tree row does not apply as it is a monoculture).

El diseño experimental de la parcela fue un central compuesto, en el cual se tuvieron dos subexperimentos con dos subrepeticiones. Uno de ellos con los árboles de manzano y otro con los cultivos anuales en asociación maíz-frijol y maíz en cultivo simple. Para el cultivo perene se cuenta con un diseño de tratamientos central compuesto rotatable de box, donde se estudian cuatro factores de la producción, dosis de nitrógeno (N), fósforo (P_2O_5), potasio (K_2O) y densidad de siembra de los árboles, generando 20 tratamientos, estudiados en bloques al azar con dos repeticiones, cada tratamiento se conformó por cinco árboles. A la par se contó con un huerto simple de manzanos al que se le aplicó una dosis de fertilización constante.

Para los cultivos anuales se contó con 16 tratamientos considerando dos factores, dos genotipos de maíz y tres genotipos de frijol, además de la densidad de plantas. Los tratamientos seleccionados de los cultivos anuales fueron los colindantes a los tratamientos de manzano seleccionados. Además, dentro de la parcela se tuvo un sistema de monocultivo de maíz bajo las mismas condiciones mencionadas para la asociación maíz-frijol. Este sistema de monocultivo fue contiguo a un huerto de manzano. Junto al mencionado sitio, se sembró un lote de maíz en monocultivo, con uso de herbicidas para el control de arvenses, con el fin de compararlo con los demás sitios en estudio (Figura 1). Para los fines de la presente investigación se definieron 10 sitios de muestreo en el sistema MIAF y seis en el monocultivo. Dentro de los 10 sitios en sistema MIAF, ocho correspondieron a la asociación maíz-frijol y dos a manzano. De los seis sitios en monocultivo, dos correspondieron a manzanos y cuatro a maíz (Cuadro 1).

Los sitios con asociación contaron con los genotipos de frijol rojo y mantequilla. En cada sitio se colectaron muestras compuestas de suelo de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (Figura 2). Las determinaciones fisicoquímicas y microbiológicas (Figura 2) se realizaron en la unidad de laboratorios del Colegio de Postgraduados, Campus Puebla.

Se calculó el índice de calidad del suelo de acuerdo con lo propuesto por Andrews, Karlen y Mitchell (2002) (Figura 3); así como los rendimientos de los cultivos y la Eficiencia Relativa de la Tierra (ERT) (Figura 4).

El valor normalizado de los ICS se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$Vn = (I_m - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (1)$$

Cuadro 1. Sitios de muestreo evaluados en el sistema MIAF y monocultivo.
Table 1. Sampling sites evaluated in the MIAF system and monoculture.

| Sitio | OSA | Genotipo | Sistema | DF | PFM | PFR |
|-------|-------|----------|-------------|--------|-----|-----|
| A1 | Sur | HS2 | MIAF | 12 500 | 0.2 | 0.8 |
| A2 | Norte | HS2 | MIAF | 12 500 | 0.2 | 0.8 |
| A3 | Sur | HS2 | MIAF | 25 000 | 0.2 | 0.8 |
| A4 | Norte | HS2 | MIAF | 25 000 | 0.2 | 0.8 |
| A5 | Sur | NB | MIAF | 12 500 | 0.2 | 0.8 |
| A6 | Norte | NB | MIAF | 12 500 | 0.2 | 0.8 |
| A7 | Sur | NB | MIAF | 25 000 | 0.2 | 0.8 |
| A8 | Norte | NB | MIAF | 25 000 | 0.2 | 0.8 |
| FM1 | Sur | AN2 | MIAF | NA | NA | NA |
| FM2 | Norte | AN2 | MIAF | NA | NA | NA |
| FS1 | Sur | AN2 | Monocultivo | NA | NA | NA |
| FS2 | Norte | AN2 | Monocultivo | NA | NA | NA |
| M1 | Sur | HS2 | Monocultivo | NA | NA | NA |
| M2 | Norte | NB | Monocultivo | NA | NA | NA |
| M3 | Sur | HS2 | Monocultivo | NA | NA | NA |
| M4 | Norte | NB | Monocultivo | NA | NA | NA |

OSA = orientación del surco respecto al árbol frutal; HS2 = maíz híbrido mejorado; NB = maíz nativo blanco; AN2 = manzana agua nueva dos; DF = Densidad de población del frijol ha^{-1} ; PFM = proporción de frijol mantequilla; PFR = proporción de frijol rojo; NA = no aplica.

ROT = row orientation relative to the fruit tree; IHM = improved hybrid maize; WNM = white native maize; AN2 = agua nueva Dos apple; BPD = bean population density ha^{-1} ; PMB = proportion of 'Mantequilla' bean; PRB = proportion of red bean; NA = not applicable.

Donde, V_n = valor normalizado del indicador; I_m = medida experimental del atributo considerado como indicador; I_{min} = valor mínimo del atributo considerado como indicador; I_{max} = valor máximo del atributo considerado como indicador. El indicador de calidad de suelo por sitio se obtuvo al promediar los valores normalizados de los ICS del Conjunto Mínimo de Datos (CMD).

Los datos se sometieron al ANOVA y prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$). Se realizó análisis de componentes principales para identificar las variables con mayor importancia y calcular el ICS. También se realizó análisis de conglomerados utilizando la distancia euclíadiana como medida de asociación (Bocanegra-González, Fernández y Galvis, 2015; Ballesteros-Correa, Morelo y Pérez, 2019). Se correlacionaron los valores de ICS y ERT del sistema MIAF, en los dos ciclos de cultivo. El paquete utilizado fue R (R Core Team, 2018).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hubo diferencias significativas en la calidad del suelo entre los sistemas evaluados (Figura 5), con una tendencia favorable hacia el sistema MIAF en la mayoría de los atributos físicos, químicos y microbiológicos. Estos hallazgos destacan la influencia del sistema MIAF en la mejora de la fertilidad del suelo y su potencial para mantener una producción sustentable.

Calidad del Suelo en los Sistemas Evaluados

Los suelos en los sitios MIAF y monocultivo mostraron variaciones en sus propiedades fisicoquímicas (Figura 5). La densidad aparente fue menor en el MIAF, lo que sugiere una mejor estructura del suelo con mayor aireación y porosidad. A su vez, la humedad gravimétrica fue más alta en este sistema MIAF, lo cual según Martínez-González, Sosa y Ortiz (2010) puede favorecer la retención de agua y proporcionando mejores condiciones para el crecimiento de los cultivos. Estos factores son clave para la estabilidad del suelo, especialmente en condiciones de temporal, donde la disponibilidad de agua es un factor limitante para la productividad agrícola.

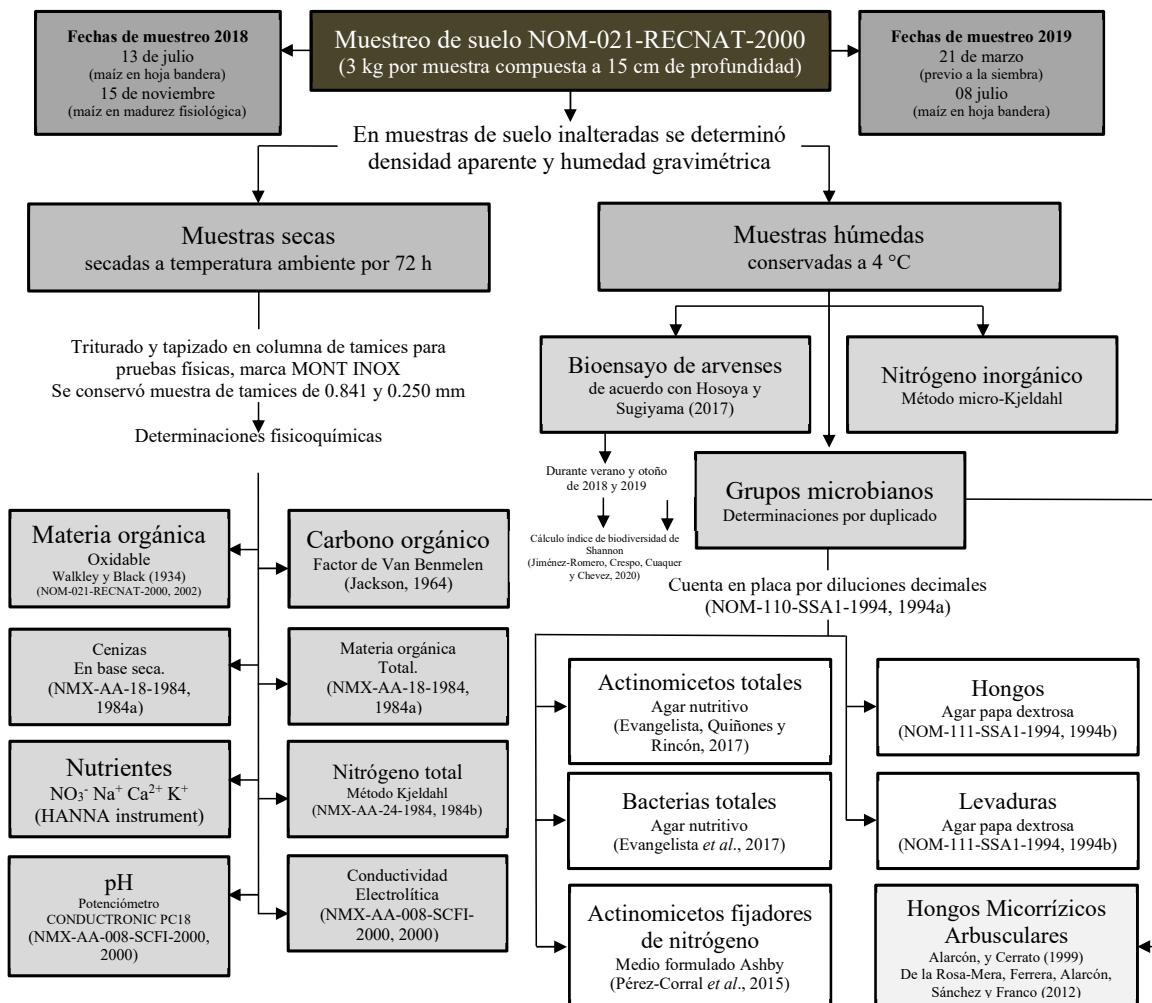


Figura 2. Muestro y análisis físico, químico y biológico de suelo. Elaboración propia.
Figure 2. Soil sampling and physical, chemical, and biological analysis. Source: Own elaboration.

En términos químicos, la materia orgánica total presentó valores significativamente mayores en el MIAF en comparación con el monocultivo. Esto puede atribuirse a la acumulación de residuos vegetales y la menor perturbación del suelo debido a la presencia de árboles frutales y cultivos intercalados (Medina-Méndez, Volke, Galvis, Cortés y Santiago, 2017; Díaz-Lezcano, Gamarra, Ruiz y Vera, 2020; Mita-Quisbert y Herve, 2021). La mayor concentración de nutrientes en los suelos bajo MIAF también puede estar relacionada con una mayor actividad biológica y la descomposición de materia orgánica. La adición de materiales orgánicos, como las que se esperarían en un sistema MIAF por la acumulación de residuos vegetales, ha demostrado incrementar la biomasa microbiana y la actividad enzimática del suelo, lo que contribuye a la fertilidad del suelo y a su capacidad de suministro de nutrientes (Stark, Condron, Stewart, Di y O'Callaghan, 2007).

Los niveles de nitrógeno total fueron altos, posiblemente debido a la presencia de leguminosas, mientras que el nitrógeno inorgánico se mantuvo bajo. Los suelos mostraron un pH moderadamente alcalino y una baja salinidad, con concentraciones de calcio y potasio de bajas a medias.

El análisis microbiológico (Figura 6) reveló que los actinomicetos fijadores de nitrógeno y las levaduras fueron más abundantes en el MIAF. La presencia de estos microorganismos es un indicador de un suelo biológicamente activo y con una mayor capacidad para el reciclaje de nutrientes (Toro *et al.*, 2005). Además, estos grupos microbianos pueden desempeñar un papel fundamental en la fijación de nitrógeno y en la descomposición de materia orgánica, mejorando así la disponibilidad de nutrientes para los cultivos (De Bedout-Mora, Solis, Valverde y Rojas, 2022).

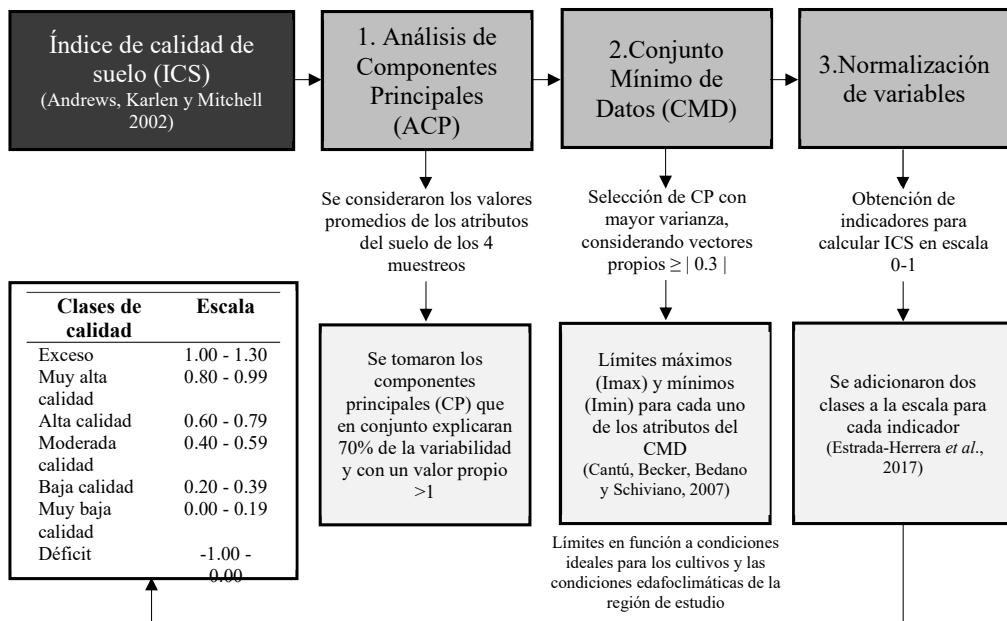


Figura 3. Cálculo del índice de calidad de suelo. Elaboración propia.
Figure 3. Calculation of the Soil Quality Index. Source: Own elaboration

El análisis de componentes principales (ACP) permitió identificar los indicadores más influyentes en la calidad del suelo (Figura 7; Cuadro 2), destacando la densidad aparente, la humedad gravimétrica, la materia orgánica total y la actividad microbiana como los factores de mayor peso en la determinación del Índice de Calidad de Suelo (ICS) (Cuadro 3). Estos resultados refuerzan la importancia de considerar la interacción de múltiples atributos del suelo al evaluar su calidad y funcionalidad en sistemas agroforestales (Bautista-Cruz y Etchevers, 2014).

Los valores del ICS variaron en los sitios A1, A2, A4 y A6 entre 2018 y 2019, mientras que en los demás sitios dichos valores se mantuvieron estables. El análisis de conglomerados (Figura 8) agrupó los sitios de muestreo en diferentes categorías según sus características promedio del ICS para los dos ciclos agrícolas. Por ejemplo, el sitio A1 (asociación maíz HS2 con frijol en MIAF, orientación sur) presentó una calidad moderada, y el sitio A6 (asociación maíz nativo blanco con frijol en MIAF, orientación norte) alcanzó una alta calidad. El resto de los sitios se clasificaron en baja calidad, según los promedios de los índices de calidad de suelo calculados (Cuadro 5).

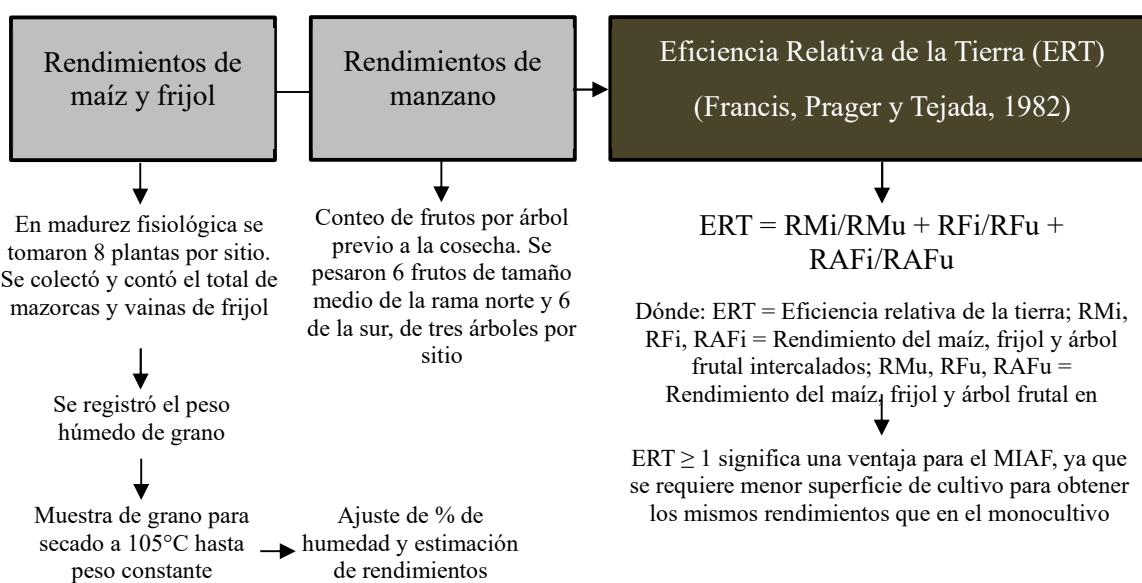


Figura 4. Cálculo de rendimientos y Eficiencia Relativa de la Tierra. Elaboración propia.
Figure 4. Calculation of yields and Land Equivalent Ratio. Source: Own elaboration.

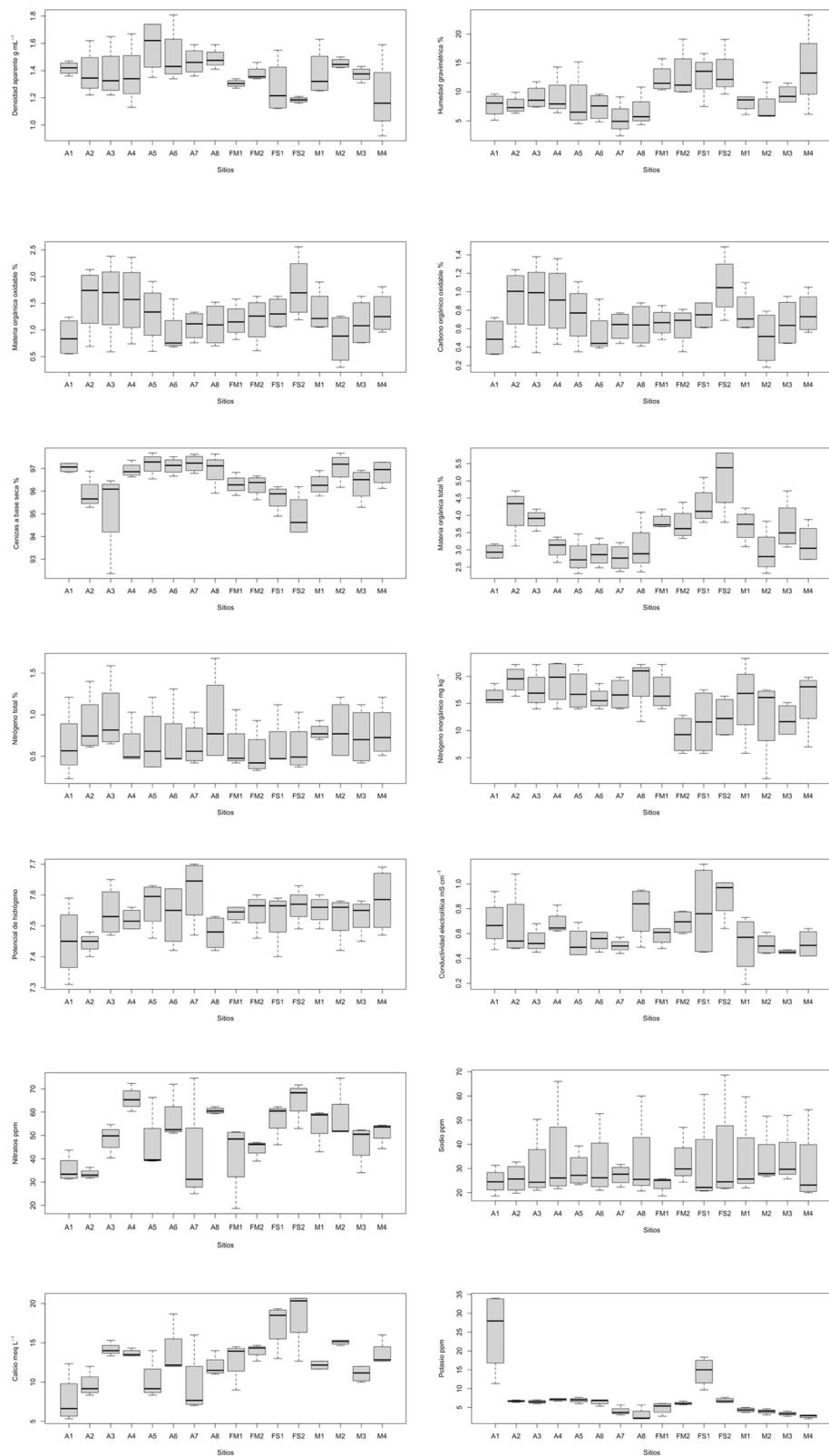


Figura 5. Cajas y bigotes de las medias de atributos fisicoquímicos de suelo (2018-2019).
Figure 5. Box-and-whisker plots of the mean soil physicochemical attributes (2018-2019).



Figura 6. Medias de abundancia de microrganismos edáficos e índice de diversidad de arveses en los sistemas evaluados.
 A = sitio con asociación maíz-frijol en MIAF; Número impar/par = orientación sur/norte respecto a la hilera del árbol, en sitios con asociación él número impar/par también representa la densidad de población de frijol de 12 500/25 000; FM = árbol frutal en MIAF; FS = árbol frutal en monocultivo; M = maíz en monocultivo, no aplica orientación respecto a la hilera del árbol. ACT = actinomicetos totales; ACFN = actinomicetos fijadores de nitrógeno; L = Levaduras; H = hongos; BT = bacterias totales; HMA = hongos micorrízicos arbustuales; HA = índice de diversidad de arveses; CV = coeficiente de variación.

Figure 6. Mean abundance of soil microorganisms and weed diversity index in the evaluated systems. A = site with maize-bean association in MIFT; Odd/even number = south/north orientation relative to the tree row (in sites with association, the odd/even number also represents the bean population density of 12,500/25,000); FM = fruit tree in MIFT; FS = fruit tree in monoculture; M = maize in monoculture (orientation relative to the tree row does not apply). TA = total actinomycetes; NFA = Nitrogen-fixing actinomycetes; Y = yeasts; F = fungi; TB = total bacteria; AMF = arbuscular mycorrhizal fungi; WDI = weed diversity index; CV = coefficient of variation.

Relación Entre la Calidad del Suelo y la Eficiencia Relativa de la Tierra

La ERT mostró valores superiores a uno (Cuadro 4), exceptuando el caso del sistema MIAF con maíz nativo blanco (ERT = 0.92), lo cual, al observar las eficiencias relativas parciales (ERP), se explica por los bajos rendimientos de frijol en sistema MIAF (ERP = 0.17) y no al maíz (ERP = 0.39) o manzano (ERP = 0.36). Un valor de ERT superior a uno indica que el sistema MIAF es más productivo por unidad de área, ya que se requeriría una mayor superficie de monocultivo para igualar sus rendimientos (Cuadro 4). Torres-Zambrano, Cortés, Turrent, Hernández y Muratalla (2008), encontraron valores de ERT = 1.10 para un sistema MIAF con durazno en la región de Huejotzingo, Puebla en 2004, mientras que Muñoz-Ruiz *et al.* (2018) encontraron una ERT = 1.74 en 2015 y de 1.41 en 2016, en un sistema MIAF con manzano var. "Gala", en una comunidad mazahua del Estado de México.

Los sitios bajo el sistema MIAF presentaron un ICS superior al de los sitios con monocultivo (Cuadro 5), y no se encontró una correlación significativa entre la calidad del suelo y la Eficiencia Relativa de la Tierra (ERT).

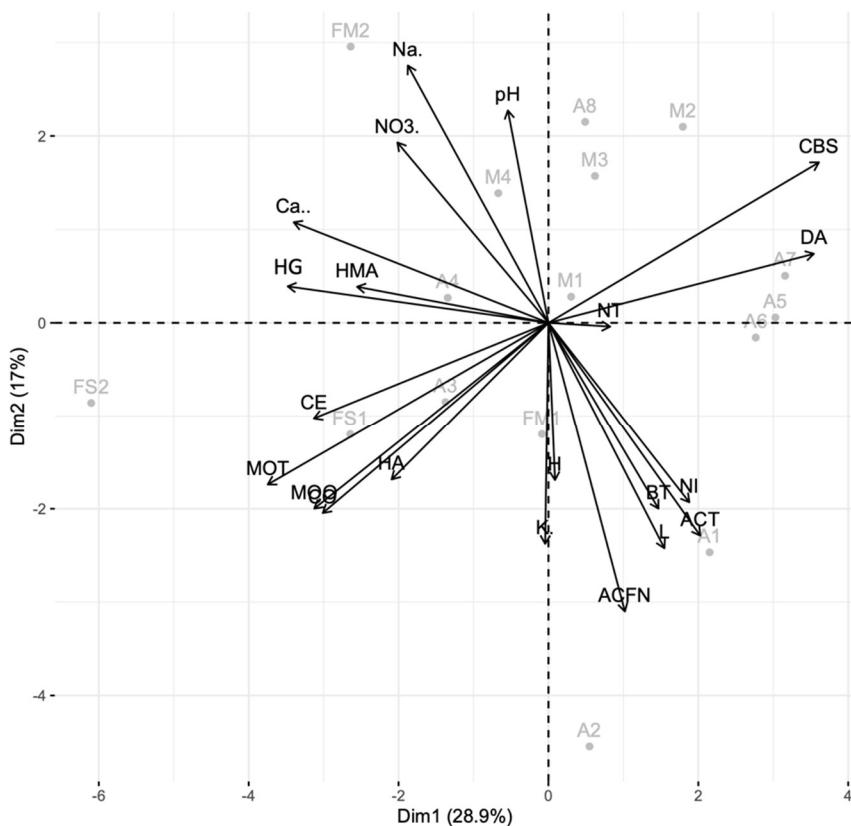


Figura 7. Distribución ortogonal del análisis de componentes principales (ACP) a partir de las características de suelo para los cuatro muestreos de suelo. DA = densidad aparente; HG = humedad gravimétrica; MOx = materia orgánica oxidable; Cox = carbono orgánico oxidable; MOT = materia orgánica total; NT = nitrógeno total; NI = nitrógeno inorgánico; CE = conductividad eléctrica; NO₃ = nitratos; Na = sodio; Ca = calcio; K = potasio; ACT = actinomicetos totales; ACFN = actinomicetos fijadores de nitrógeno; L = levaduras; H = hongos; BT = bacterias totales; HMA = hongos micorrízicos arbusculares; HA = índice de Shannon para arveses.

Figure 7. Orthogonal distribution of the Principal Component Analysis (PCA) based on soil characteristics for the four soil samplings. BD = bulk density; GM = gravimetric moisture; OOM = oxidizable organic matter; OOC = oxidizable organic carbon; DBA = dry basis ash; TOM = total organic matter; TN = total nitrogen; IN = inorganic nitrogen; EC = electrical conductivity; NO₃ = nitrates; Na = sodium; Ca = calcium; K = potassium; TA = total actinomycetes; NFA = nitrogen-fixing actinomycetes; Y = yeasts; F = fungi; TB = total bacteria; AMF = arbuscular mycorrhizal fungi; WSI = weed shannon index.

Esto indica que, si bien la calidad del suelo es un factor determinante para la sostenibilidad del sistema, no es el único elemento que influye en la eficiencia productiva del MIAF. Esto concuerda con lo reportado por otros investigadores, en el sentido de que existen otros factores que pueden tener influencia importante en la productividad del sistema, como son las interacciones entre cultivos (Hernández-Escobar, Cortés, Turrent y Camas, 2024), el manejo agronómico (Arriaga-Vázquez *et al.*, 2020) y las condiciones climáticas (Turrent *et al.*, 2017).

Estudios previos señalan que la mejora en la calidad del suelo en sistemas agroforestales puede generar beneficios a mediano y largo plazo (Contreras-Santos *et al.*, 2023), particularmente, en la estabilidad de los rendimientos y la resiliencia del agroecosistema ante condiciones adversas (Fonseca-Restrepo, Angulo y Piedrahita, 2023). En este contexto, el MIAF constituye una alternativa viable para productores con pequeñas superficies, ya que optimiza el uso de los recursos naturales, mejora la calidad del suelo y promueve una mayor biodiversidad en el sistema productivo.

Cuadro 2. Resultados ACP a partir de las características de suelo promedio por sitio
Table 2. PCA results based on mean soil characteristics by site.

| Componentes Principales | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 | CP5 |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Valores propios | 6.07 | 3.58 | 2.59 | 2.19 | 1.50 |
| %Varianza explicada | 28.89 | 17.04 | 12.35 | 10.42 | 7.16 |
| %Varianza acumulada | 28.89 | 45.92 | 58.27 | 68.69 | 75.85 |
| Vectores propios | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Densidad aparente (DA) | 0.32 [†] | 0.09 | 0.18 | 0.13 | 0.17 |
| Humedad gravimétrica (HG) | -0.31 [†] | 0.05 | -0.11 | -0.18 | -0.08 |
| Materia orgánica total (MOT) | -0.34 [†] | -0.20 | -0.06 | 0.00 | 0.00 |
| Nitrógeno inorgánico (NI) | 0.17 | -0.23 | 0.15 | 0.35 [†] | -0.22 |
| pH | -0.05 | 0.27 | -0.39 [†] | 0.07 | -0.19 |
| Nitratos (NO ₃) | -0.18 | 0.23 | -0.11 | 0.29 | 0.41 [†] |
| Sodio (Na) | -0.17 | 0.32 [†] | -0.07 | 0.22 | 0.29 |
| Calcio (Ca) | -0.30 [†] | 0.13 | -0.21 | 0.10 | 0.29 |
| Potasio (K) | 0.00 | -0.28 | 0.17 | -0.35 | 0.34 [†] |
| Actinomicetos fijadores de nitrógeno (ACFN) | 0.09 | -0.36 [†] | -0.10 | 0.04 | 0.06 |
| Levaduras (L) | 0.14 | -0.28 | -0.36 [†] | -0.08 | 0.00 |
| Hongos (H) | 0.01 | -0.20 | -0.45 [†] | -0.19 | -0.01 |
| Bacterias totales (BT) | 0.13 | -0.23 | -0.29 | 0.17 | 0.31 [†] |
| Índice de Shannon para arvenses (HA) | -0.19 | -0.20 | 0.40 [†] | 0.02 | 0.14 |

[†] Atributos seleccionados (vector propio $\geq |0.3|$) para formar el CMD.

[†] Selected attributes (eigenvector $\geq |0.3|$) to form the CM.

Cuadro 3. Indicadores propuestos para calcular el ICS a partir del CMD.
Table 3. Proposed indicators to calculate the ICS from the CMD.

| Indicador | Unidad | Valor máximo (I _{max}) | Valor mínimo (I _{min}) |
|---|---|----------------------------------|----------------------------------|
| Densidad aparente (DA) | g mL ⁻¹ | 1.50 | 1.05 |
| Humedad gravimétrica (HG) | % | 40 | 5 |
| Materia orgánica total (MOT) | % | 6.0 | 2.0 |
| Calcio (Ca) | meq L ⁻¹ | 500 | 220 |
| Potasio (K) | mg L ⁻¹ | 195 | 39 |
| Sodio (Na) | mg L ⁻¹ | 391 | 92 |
| Nitratos (NO ₃) | mg L ⁻¹ | 500 | 120 |
| pH | - | 8.0 | 5.0 |
| Nitrógeno inorgánico (NI) | mg kg ⁻¹ | 10 | 50 |
| Índice de Shannon para arvenses (HA) | - | 0 | 2.5 |
| Levaduras (L) | UFC $\times 10^3$ g ⁻¹ suelo | 1000.0 | 100.0 |
| Hongos (H) | UFC $\times 10^3$ g ⁻¹ suelo | 1000.0 | 1.0 |
| Actinomicetos fijadores de nitrógeno (ACFN) | UFC $\times 10^3$ g ⁻¹ suelo | 10 000.0 | 100.0 |
| Bacterias totales (BT) | UFC $\times 10^3$ g ⁻¹ suelo | 10 000.0 | 100.0 |

UFC = unidades formadoras de colonias.

CFU = colony-forming units.

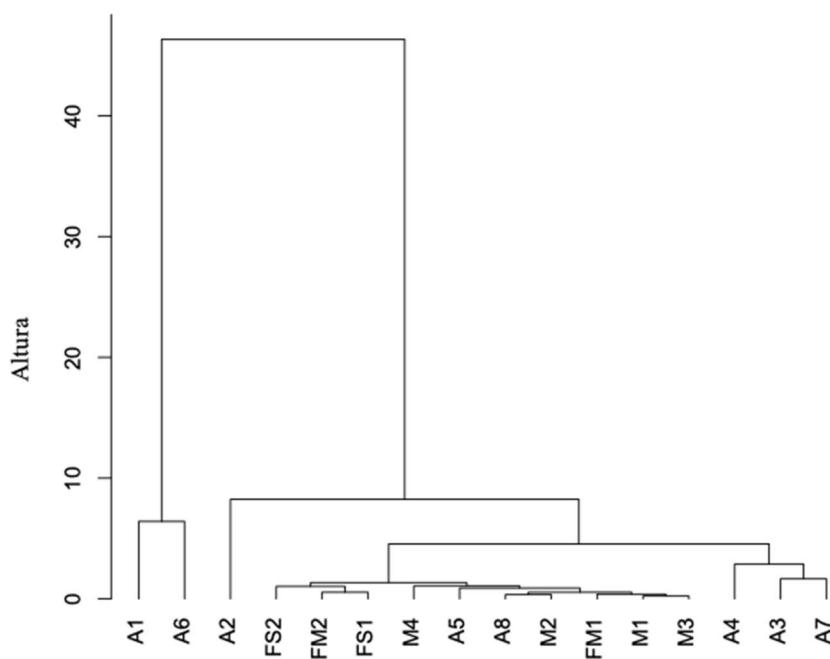
Dendograma ICS 2018-2019

Figura 8. Análisis de Conglomerados de promedios de ICS 2018 y 2019.
Figure 8. Cluster analysis of ICS means for 2018 and 2019.

Cuadro 4. Rendimientos promedio y ERT en MIAF.
Table 4. Average yields and LER in MIFT.

| Cultivo | Maíz HS2 | | | Cultivo | Maíz nativo blanco | | | |
|---------------------|---|---------------------------|------|---------|---|---------------------------|------|--|
| | MIAF Mg 0.66/0.33 ha ⁻¹ * | CS Mg ha ⁻¹ | ERP | | MIAF Mg 0.66/0.33 ha ⁻¹ * | CS Mg ha ⁻¹ | ERP | |
| | | | | | | | | |
| Maíz | 6.22 | 7.92 | 0.79 | Maíz | 6.58 | 8.49 | 0.78 | |
| Frijol | 1.00 | 1.33 | 0.75 | Frijol | 0.68 | 2.01 | 0.34 | |
| Manzano | 2.30 | 6.31 | 0.36 | Manzano | 2.30 | 6.31 | 0.36 | |
| ERT | | | 1.90 | ERT | | | 1.48 | |
| Ciclo agrícola 2019 | | | | | | | | |
| Cultivo | Maíz HS2 | | | Cultivo | Maíz nativo blanco | | | |
| | MIAF Mg 0.33 ha ⁻¹ | CS Mg ha ⁻¹ | ERP | | MIAF Mg 0.33 ha ⁻¹ | CS Mg ha ⁻¹ | ERP | |
| | | | | | | | | |
| Maíz | 5.86 | 8.51 | 0.69 | Maíz | 6.46 | 8.51 | 0.76 | |
| Frijol | 0.78 | 1.12 | 0.70 | Frijol | 0.74 | 1.12 | 0.66 | |
| Manzano | 6.03 | 10.87 | 0.55 | Manzano | 6.03 | 10.87 | 0.55 | |
| ERT | | | 1.94 | ERT | | | 1.97 | |

MIAF = rendimientos expresados sobre la base de dos tercios de hectárea: Mg 0.66 ha⁻¹ para maíz-frijol y un tercio de hectárea: Mg 0.33 ha⁻¹ para manzano; CS = cultivo simple, rendimientos expresados en Mg ha⁻¹; ERP = eficiencia relativa parcial del cultivo, dividiendo el rendimiento en MIAF entre el rendimiento del cultivo simple en una hectárea; ERT = eficiencia relativa de la tierra obtenida por la suma de las ERP de los tres cultivos.

MIFT = yields expressed on the basis of two-thirds of a hectare: 0.66 Mg ha⁻¹ for maize-bean and one-third of a hectare: 0.33 Mg ha⁻¹ for apple; SC = sole crop, yields expressed in Mg ha⁻¹; PRE = partial relative efficiency of the crop, dividing the yield in MIFT by the yield of the sole crop in one hectare; LER = land equivalent ratio obtained by the sum of the PREs of the three crops.

Cuadro 5. Indicadores ICS para el ciclo agrícola 2018 y 2019.
Table 5. ICS indicators for the 2018 and 2019 agricultural cycles.

| Sitio | Valores promedios de ICS por indicadores para el ciclo agrícola 2018 y 2019 | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|---|------|------|-------|------|-------|------|------|------|-------|-------|------------------------------|-------|------|-------|
| | MOT | DA | HG | Ca | ACFN | Na | H | HA | pH | L | NI | NO ₃ ⁻ | K | BT | Media |
| A1 | 0.29 | 0.64 | 0.09 | -0.27 | 0.04 | 0.08 | 3.65 | 0.70 | 0.81 | 0.08 | 0.15 | 0.14 | 0.46 | 0.03 | 0.49 |
| A2 | 0.53 | 0.60 | 0.11 | -0.10 | 1.32 | 0.07 | 0.44 | 0.73 | 0.81 | 0.43 | 0.23 | 0.13 | -0.04 | 0.03 | 0.38 |
| A3 | 0.47 | 0.60 | 0.16 | 0.23 | 0.01 | 0.05 | 0.48 | 0.74 | 0.85 | 0.48 | 0.19 | 0.32 | -0.04 | 0.03 | 0.33 |
| A4 | 0.27 | 0.58 | 0.16 | 0.19 | 0.04 | 0.21 | 1.28 | 0.70 | 0.84 | 0.35 | 0.23 | 0.55 | -0.02 | 0.00 | 0.38 |
| A5 | 0.20 | 0.97 | 0.13 | -0.06 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 0.69 | 0.86 | 0.26 | 0.18 | 0.29 | -0.03 | 0.06 | 0.26 |
| A6 | 0.22 | 0.82 | 0.09 | 0.20 | 0.03 | 0.12 | 3.98 | 0.58 | 0.84 | 1.16 | 0.15 | 0.43 | -0.04 | 0.06 | 0.62 |
| A7 | 0.19 | 0.76 | 0.01 | -0.10 | 0.01 | 0.07 | 0.98 | 0.53 | 0.87 | 0.91 | 0.17 | 0.22 | -0.12 | 0.05 | 0.32 |
| A8 | 0.26 | 0.79 | 0.07 | 0.07 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.70 | 0.83 | -0.11 | 0.22 | 0.48 | -0.15 | 0.02 | 0.23 |
| FM1 | 0.46 | 0.46 | 0.29 | 0.13 | 0.02 | 0.12 | 0.07 | 0.71 | 0.85 | -0.08 | 0.18 | 0.23 | -0.09 | 0.03 | 0.24 |
| FM2 | 0.43 | 0.60 | 0.31 | 0.21 | 0.01 | 0.17 | 0.23 | 0.73 | 0.85 | -0.03 | -0.02 | 0.27 | -0.06 | 0.20 | 0.28 |
| FS1 | 0.57 | 0.41 | 0.31 | 0.45 | 0.02 | 0.10 | 0.24 | 0.73 | 0.84 | -0.03 | 0.04 | 0.44 | 0.21 | 0.27 | 0.33 |
| FS2 | 0.77 | 0.24 | 0.33 | 0.54 | 0.01 | 0.07 | 0.02 | 0.70 | 0.85 | -0.08 | 0.06 | 0.54 | -0.03 | 0.02 | 0.29 |
| M1 | 0.42 | 0.60 | 0.12 | 0.08 | 0.00 | 0.08 | 0.15 | 0.63 | 0.85 | 0.01 | 0.14 | 0.41 | -0.11 | 0.02 | 0.24 |
| M2 | 0.23 | 0.73 | 0.09 | 0.29 | 0.00 | 0.12 | 0.05 | 0.64 | 0.84 | -0.02 | 0.07 | 0.44 | -0.12 | 0.00 | 0.24 |
| M3 | 0.42 | 0.59 | 0.18 | 0.01 | 0.02 | 0.13 | 0.11 | 0.53 | 0.84 | 0.05 | 0.05 | 0.30 | -0.14 | 0.00 | 0.22 |
| M4 | 0.29 | 0.28 | 0.36 | 0.18 | 0.01 | -0.02 | 0.01 | 0.56 | 0.86 | -0.03 | 0.14 | 0.36 | -0.16 | 0.00 | 0.20 |
| Media ICS | 0.38 | 0.60 | 0.18 | 0.13 | 0.10 | 0.10 | 0.73 | 0.66 | 0.84 | 0.21 | 0.14 | 0.35 | -0.03 | 0.05 | 0.32 |

MOT = materia orgánica total; DA = densidad aparente; HG = humedad gravimétrica; Ca = calcio; ACFN = actinomicetos fijadores de nitrógeno; Na = sodio; H = hongos; HA = índice de Shannon para arvenses; L = levaduras; NI = nitrógeno inorgánico; NO₃ = nitratos; K = potasio; BT = bacterias totales.

TOM = total organic matter; BD = bulk density; GM = gravimetric moisture; Ca = calcium; NFA = nitrogen-fixing actinomycetes; Na = sodium; F = fungi; SIW = shannon index for weeds; Y = yeasts; IN = inorganic Nitrogen; NO₃ = nitrates; K = potassium; TB = total bacteria.

Implicaciones para la Agricultura Sustentable

Los resultados de este estudio subrayan la importancia de considerar la calidad del suelo en la evaluación de sistemas agroforestales como el MIAF. La combinación de cultivos anuales con especies perennes contribuye a la conservación del suelo, y puede mejorar su fertilidad y estructura a través del tiempo. Los hallazgos confirman que el MIAF optimiza el uso de la tierra al lograr mayores rendimientos en una superficie menor, lo que se demuestra con una ERT superior a uno. Esto tiene implicaciones directas para la agricultura sustentable, ya que la mayor calidad del suelo observada, evidenciada por la mejora en la materia orgánica y la actividad microbiológica, indica un agroecosistema más saludable y resiliente. Un suelo con mejor estructura y mayor capacidad de retención de agua y nutrientes reduce la dependencia de insumos externos como fertilizantes, lo que contribuye a la sostenibilidad económica y ambiental del sistema. Aunque no se observó una correlación directa entre el ICS y la ERT, los hallazgos sugieren que la mejora de la calidad del suelo es un factor clave para la sostenibilidad a largo plazo. Por ello, se recomienda la implementación de prácticas de manejo que potencien la acumulación de materia orgánica y la actividad biológica. El MIAF representa una alternativa viable y efectiva para productores con pequeñas superficies, ya que optimiza los recursos naturales y fomenta una mayor biodiversidad.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran que el MIAF tiene valores superiores en atributos clave como la densidad aparente, la materia orgánica total, la humedad gravimétrica y la abundancia de microorganismos benéficos como actinomicetos fijadores de nitrógeno y levaduras, en comparación con los monocultivos. Este hallazgo confirma que el MIAF mejora de forma integral al suelo.

A pesar de que el MIAF presenta una mejora en el suelo y una ERT superior a uno, no se encontró una correlación significativa entre el Índice de Calidad del Suelo (ICS) y la ERT. Esto sugiere que la productividad en el sistema MIAF no depende únicamente de la calidad del suelo, sino que también está influenciada por otros factores como las interacciones entre cultivos y el manejo agronómico.

La investigación demostró que el MIAF puede alcanzar mayores rendimientos en menor superficie, mejorando el uso de la tierra con una ERT superior a uno. Esto lo convierte en una opción viable para pequeños productores, ya que mejora la calidad del suelo y la productividad a largo plazo

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

Todos los autores han leído y aprobado el manuscrito final y han dado su consentimiento para su publicación.

DISPONIBILIDAD DE DATOS DE APOYO

Los conjuntos de datos generados y/o analizados durante el estudio actual no están disponibles públicamente debido a que forman parte de un conjunto de datos más amplio destinado a futuras publicaciones, pero están disponibles a través del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación fue financiada por el Colegio de Postgraduados a través del Apoyo a Estudiantes y con fondos propios. El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología financió la beca para los estudios doctorales del primer autor.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: T.D.G., I.O.F. y E.H.R.; Metodología: T.D.G., J.C.H., J.A.H.G. y E.H.R.; Software: T.D.G.; Validación: T.D.G., J.A.H.G. y E.H.R.; Análisis formal: T.D.G., J.C.H. y J.A.H.G.; Investigación: T.D.G. y E.H.R.; Recursos: T.D.G., I.O.F. y E.H.R.; Curación de datos: T.D.G., I.O.F. y J.C.H.; Escritura – preparación del borrador original: T.D.G., I.O.F. y J.C.H.; Escritura – revisión y edición: T.D.G., I.O.F., J.C.H., J.A.H.G., A.M.L. y D.J.G.; Visualización: T.D.G., I.O.F. y J.C.H.; Supervisión: I.O.F., J.A.H.G. y E.H.R.; Administración del proyecto: T.D.G. y I.O.F.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONAHCYT por el financiamiento de beca al primer autor, al Colegio de Postgraduados por su apoyo con recursos para realizar el presente estudio. A Don Hipólito (D.E.P.), a su esposa María y su hijo Iván, por permitir realizar la presente investigación en su parcela y a la Ing. Reyna Rojas por su apoyo con las actividades de campo.

LITERATURA CITADA

- Afanador-Barajas, L. N., Coca-Peña, D. A., Vargas-Giraldo, A. F., Bautista-Murcia, M. F., Hernández, A. M., & Vallejo-Quintero, V. E. (2020). Evaluación de la calidad de suelos en agroecosistemas de Colombia a través de la selección de un conjunto mínimo de datos. *Colombia Forestal*, 23(1), 35-50. <https://doi.org/10.14483/2256201X.14856>
- Alarcón, A., & Cerrato, R. F. (1999). Manejo de la micorriza arbuscular en sistemas de propagación de plantas frutícolas. *Terra Latinoamericana*, 17(3), 179-191.
- Albino, G., Turrent, F., Cortés, F., González, E., Mendoza, C., Volke, H., & Santiago, M. (2016). Optimización económica de N, P, K y densidades de plantación en maíz y frijol intercalados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 993-1004. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i5.226>

- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90(1), 25-45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
- Arriaga-Vázquez, A., Martínez-Menez, M., Rubiños-Panta, J., Fernández-Reynoso, D., 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>
- Ascencio-López, W. J., Pérez-Ramírez, N., Méndez-Espinoza, J. A., Regalado-López, J., Ramírez-Juárez, J., & Cajuste-Bontemps, L. (2018). Permanencia del uso de suelo agrícola ante la presión urbana-industrial en Huejotzingo, Puebla, México. *Acta Universitaria*, 28(2), 42-52. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1496>
- Ballesteros-Correa, J., Morelo-García, L., & Pérez-Torres, J. (2019). Composición y estructura vegetal de fragmentos de bosque seco tropical en paisajes de ganadería extensiva bajo manejo silvopastoril y convencional en Córdoba, Colombia. *Caldasia*, 41(1), 224-234. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v41n1.71320>
- Barrera-León, J., Barrezueta-Unda, S., & García-Batista, R. (2020). Evaluación de los índices de calidad del suelo de diversos cultivos en diferentes condiciones topográficas. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 3(1), 182-190.
- Bautista-Cruz, A., & Etchevers, B. (2014). *Una Revisión sobre los Conceptos de la Calidad del Suelo: Sus Indicadores e Índices*. España : Editorial Académica Española.
- Bocanegra-González, K. T., Fernández-Méndez, F., & Galvis-Jiménez, J. D. (2015). Grupos funcionales de árboles en bosques secundarios de la región Bajo Calima (Buenaventura, Colombia). *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 19(1), 17-40. <https://doi.org/10.17151/bccm.2015.19.1.2>
- Cadena-Iñiguez, P., Camas-Gómez, R., López-Báez, W., López-Gómez, H., & González-Cifuentes, J. (2018). El MIAF, una alternativa viable para laderas en áreas marginadas del sureste de México: caso de estudio en Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(7), 1351-1361. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1670>
- Cantú, M., Becker, A., Bedano, J., & Schiviano, H. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices en la Pampa Argentina. *Ciencia Suelo*, 25, 173-178.
- Castillo-Valdez, X., Etchevers, J. D., Hidalgo-Moreno, C. I., & Aguirre-Gómez, A. (2021). Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-12. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.698>
- Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., Rodriguez-Vitola, J. L., Barragán-Hernandez, W., Garrido-Pineda, J., & Falla-Guzman, C. K. (2023). Índice de calidad del suelo bajo sistemas agropecuarios en el bosque seco tropical-Colombia. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-18. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1694>
- Cortez-Egremy, J. G., Baca del Moral, J., Uribe-Gómez, M., Gómez-Hernández, T., & Valdés-Velarde, E. (2022). La multifuncionalidad de la agricultura como herramienta de análisis de políticas agrarias: el caso del programa Sembrando Vida en Chahuites, Oaxaca. *Acta Universitaria*, 32, 1-18.
- De Bedout-Mora, M., Solis-Ramos, L., Valverde-Barrantes, O., & Rojas-Jiménez, K. (2022). Capacidad de nodulación en especies forestales leguminosas (Fabaceae) según su filogenia y características morfológicas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 19(45), 1-8. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v19i45.6315>
- De la Rosa-Mera, C., Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A., Sánchez-Colín, M., & Franco-Ramírez, A. (2012). Aislamiento de consorcios de hongos micorrízicos arbustulares de plantas medicinales y su efecto en el crecimiento de vinca (*Catharanthus roseus*). *Revista Chilena de Historia Natural*, 85(2), 187-198. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2012000200005>
- Díaz-Lezcano, M., Gamarra-Lezcano, C., Ruiz-Díaz, S., & Vera-de Ortíz, M. (2020). Contenido de materia orgánica en suelos de sistemas silvopastoriles establecidos en el Chaco Central paraguayo. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 25(2), 131-143. <https://doi.org/10.32480/rscp.2020.25.2.131>
- Estrada-Herrera, I., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz, S., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51, 813-831.
- Evangelista, M., Quiñones, A., & Rincón, E. (2017). Potencial biotecnológico de las actinobacterias aisladas de suelos de México como fuente natural de moléculas bioactivas: compuestos antimicrobianos y enzimas hidrolíticas. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 21(63), 39-51.
- Fonseca-Restrepo, C., Angulo-Cubillán, F., & Piedrahita-Fonseca, M. J. (2023). Alternativas agroecológicas para la resiliencia de especies forrajeras frente al cambio climático. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 8(1), 18-23. <https://doi.org/10.24054/cyta.v8i1.2876>
- Francis, C. A., Prager, M., & Tejada, G. (1982). Density interactions in tropical intercropping. I. Maize (*Zea mays L.*) and climbing beans (*Phaseolus vulgaris L.*). *Field Crops Research*, 5, 163-176.
- Hernández-Escobar, M. R., Cortés-Flores, J. I., Turrent-Fernández, A., & Camas-Gómez, R. (2024). Corn and beans in MIAF with different tillages and topological arrangements. *Revista Terra Latinoamericana*, 42, 1-16. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1388>
- Hosoya, K., & Sugiyama, S. I. (2017). Weed communities and their negative impact on rice yield in no-input paddy fields in the northern part of Japan. *Biological Agriculture & Horticulture*, 33(4), 215-224. <https://doi.org/10.1080/01448765.2017.1299641>
- INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal). (2016). *Enciclopedia de los municipios de delegaciones de México, Estado de Puebla*. Puebla: Secretaría de Gobernación.
- Jackson, M. L. (1964). *Ánalisis químicos de suelos*. Barcelona, España: Omega.
- Jiménez-Romero, E. M., Crespo-Gutiérrez, R. S., Cuquer-Fuel, E., & Chevez-Alejandro, A. P. (2020). Relación de arveses en plantaciones de Tectona grandis L. f. (teca) y su banco de semillas en la zona central del litoral ecuatoriano. *Centrosur Agraria*, 69, 69-91.
- Juárez, P., Tuñón, P., Winton, A., & Zapata, M. (2018). Relaciones socio-espaciales de género y participación de las mujeres en el proyecto Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) en Chiapas. *Revista Interdisciplinaria de Estudios de Género de el Colegio de México*, 4(18), 1-37. <https://doi.org/10.24201/eg.v4i0.208>
- Martínez-González, F., Sosa-Pérez, F., & Ortiz-Medel, J. (2010). Behavior of soil moisture with different plant covers in the La Esperanza watershed. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(4), 89-103.
- Medina-Méndez, J., Volke-Haller, V., Galvis-Spínola, A., Cortés-Flores, J. I., & Santiago-Cruz, M. J. (2017). Incremento de la materia orgánica del suelo y rendimiento de mango en Luvisoles, Campeche, México. *Agronomía Mesoamericana*, 28(2), 499-508. <https://doi.org/10.15517/ma.v28i2.22236>
- Mita-Quisbert, V., & Herve, D. (2021). Diagnóstico de la fertilidad del suelo y análisis de la introducción de la mecanización agrícola en las familias Uru Chipayas. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales, La Paz*, 8(3), 31-44. <https://doi.org/10.53287/fkfb8438dz68f>
- Muñoz-Ruiz, E., Santiago, M., Alibio, G., & Rivera, P. (2018). El sistema milpa intercalada con árboles frutales incrementa la eficiencia relativa de la tierra en una comunidad mazahua del Estado de México. *Cadernos de Agroecología*, 13(1), 1-5.

- Navarro-Bravo, A., Figueroa-Sandoval, B., Martínez-Menes, M., González-Cossío, F., & Osuna-Ceja, E. S. (2008). Indicadores físicos del suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos. *Agricultura Técnica en México*, 34(2), 151-158.
- NMX-AA-008-SCFI-2000 (Norma Oficial Mexicana). (2000). Análisis de agua - determinación del pH - método de prueba, publicada el 19 de septiembre de 2000. *Diario Oficial de la Federación*. México, D. F.: SEGOB.
- NMX-AA-18-1984 (Norma Oficial Mexicana). (1984a). Protección al ambiente-contaminación de suelo- residuos sólidos municipales- determinación de cenizas, publicada el 14 de diciembre de 1984. *Diario Oficial de la Federación*. México, D. F.: SEGOB.
- NMX-AA-24-1984 (Norma Oficial Mexicana). (1984b). Protección al ambiente-contaminación de suelo- residuos sólidos municipales- determinación de nitrógeno total, publicada el 15 de diciembre de 1984. *Diario Oficial de la Federación*. México, D. F.: SEGOB.
- 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.
- NOM-110-SSA1-1994 (Norma Oficial Mexicana). (1994a). Bienes y servicios, preparación y dilución de muestras de alimentos para su análisis microbiológico, publicada el 16 de octubre de 1995. *Diario Oficial de la Federación*. México, D. F.: SEGOB.
- NOM-111-SSA1-1994 (Norma Oficial Mexicana). (1994b). Bienes y servicios. Métodos para la cuenta de mohos y levaduras en alimentos, publicada el 13 de septiembre de 1995. *Diario Oficial de la Federación*. México, D. F.: SEGOB.
- Ocampo-Guzmán, M. G., & Urbina-López, S. J. (2017). Estrategias para garantizar la seguridad alimentaria en la región Altos de Chiapas. En B. Cavalloti Vázquez & N. M. Keilbach Baer (Coords.). *Méjico rural ante los retos del siglo XXI. Tomo III: Seguridad alimentaria* (pp. 47-62). Ciudad de México, México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Pérez-Corral, D., García-González, N., Gallegos-Morales, G., Ruiz-Cisneros, M., Berlanga-Reyes, D., & Ríos-Velasco, C. (2015). Aislamiento de actinomicetos asociados a rizosfera de árboles de manzano antagónicos a Fusarium equiseti. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7), 1629-1638.
- Pillado-Albarrán, K. V., Albino-Garduño, R., Santiago-Mejía, H., & Pedraza-Mandujano, J. (2023). Elementos bioculturales, base para la adaptación del sistema MIAF en la zona mazahua del Estado de México. *Estudios sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo*, 32(60), 1-33. <https://doi.org/10.24836/es.v32i60.1247>
- R Core Team (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Autria: R Foundation for Statistical Computing.
- Stark, C., Condron, L. M., Stewart, A., Di, H. J., & O'Callaghan, M. (2007). Influence of organic and mineral amendments on microbial soil properties and processes. *Applied Soil Ecology*, 35(1), 79-93.
- Torres-Zambrano, J. P., Cortés-Flores, J. I., Turrent-Fernández, A., Hernández-Romero, E., & Muratalla-Lúa, A. (2008). Rendimiento de fruto y número de ramas principales en árboles de durazno intercalados con milpa. *Terra Latinoamericana*, 26(3), 265-273.
- Toro, M. E., Oro, N. P., Vega, A. D., Maturano, Y. P., Nally, M. C., Fernández, E., ... & Vázquez, F. (2005). Diversidad de levaduras en canopias y suelos asociados con *Bulnesia retama* y *Larrea divaricata*. *Revista Argentina de Microbiología*, 37(4), 209-213.
- Turrent, F., Cortés, F., Espinosa, C., Hernández, R., Camas, G., Torres, Z., & Zambada, M. (2017). MasAgro o MIAF ¿Cuál es la opción para modernizar sustentablemente la agricultura tradicional de México? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(5), 1169-1185. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.116>
- Walkley, A., & Black, I. A. (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(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>