



MICROBIAL GROUPS IN A MILPA AGROECOSYSTEM INTERCLASSED WITH FRUIT TREES IN HIGH VALLEYS OF PUEBLA, MÉXICO †

[GRUPOS MICROBIANOS EN UN AGROECOSISTEMA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES EN VALLES ALTOS DE PUEBLA, MÉXICO]

T. T. A. Duché-García¹, I. Ocampo-Fletes¹, J. Cruz-Hernández^{1*},
J. A. Hernández-Guzmán¹, A. Macías-López¹, D. Jiménez-García²
and E. Hernández-Romero¹

¹*Colegio de Postgraduados Campus Puebla. Boulevard Forjadores de Puebla Núm. 205, Santiago Momoxpan, Municipio de San Pedro Cholula. C.P. 72760, Puebla, México. Email tabaredg@gmail.com, ocampoif@colpos.mx, javi_69rey@hotmail.com, arahon@colpos.mx, mantonio@colpos.mx, eromero93@hotmail.com*

²*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. Email daniel.jimenez@correo.buap.mx*

*Corresponding author

SUMMARY

Background: Microorganisms play a fundamental role in soil dynamics of agroecosystems. **Objective:** To determine soil quality parameters and the abundance of functional groups of edaphic microorganisms in eight different contrasting sites evaluated in a milpa agroecosystem interclassified with fruit trees (MIAF) and in monocultures system. **Methodology:** Bulk density, humidity, pH, electrical conductivity, percentage of ash, oxidizable organic matter, oxidizable carbon, total nitrogen, inorganic nitrogen and nutrients (NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} and K^+) were determined in composite soil samples by triplicate for each sites, as well as the diversity of weeds and abundance of total actinomycetes, nitrogen-fixing actinomycetes, yeasts, fungi, bacteria, and arbuscular mycorrhizal fungal spores. A principal component analysis was carried out to calculate a soil quality index (SQI). Analysis of variance, Tukey's mean comparison test ($P \leq 0.05$), linear correlation, cluster analysis and canonical correlation were performed. **Results:** A greater amount of total actinomycetes ($> 4 \text{ Log CFU g}^{-1} \text{ soil}$) and nitrogen-fixing actinomycetes ($> 3.8 \text{ Log CFU g}^{-1} \text{ soil}$) and fungi ($> 1.7 \text{ Log CFU g}^{-1} \text{ soil}$) were observed in the MIAF system compared to the monocultures. For the sites with corn-bean association in the MIAF system, a high positive correlation was observed between organic matter content and nitrogen-fixing actinomycetes ($r = 0.60$) and yeasts ($r = 0.73$), as well as with the percentage of total nitrogen with yeasts ($r = 0.70$) and nitrogen-fixing actinomycetes ($r = 0.75$). **Implications:** The methodology used allowed the grouping of the sites studied, based on the SQI and a reduced set of variables. **Conclusion:** The MIAF system favored the abundance of functional groups, soil quality parameters and the availability of nutrients in the soil compared to the monoculture sites.

Key words: Actinomycetes; apple tree; corn-bean; fungus; soil.

RESUMEN

Antecedentes: Los microorganismos tienen un papel fundamental en la dinámica del suelo de agroecosistemas. **Objetivo:** Determinar parámetros de calidad de suelo y la abundancia de grupos funcionales de microorganismos edáficos en ocho diferentes sitios contrastantes evaluados en un sistema de milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) y en monocultivos. **Metodología:** En muestras compuestas de suelo tomadas de cada sitio se determinó por triplicado la densidad aparente, humedad, pH, conductividad eléctrica, porcentaje de cenizas, materia orgánica oxidable, carbono oxidable, nitrógeno total, nitrógeno inorgánico y nutrientes (NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} y K^+), al igual que la diversidad de arvenses y abundancia de actinomicetos totales, actinomicetos fijadores de nitrógeno, levaduras, hongos, bacterias y esporas de hongos micorrízicos arbusculares. Con los datos obtenidos se realizó un análisis de componentes principales para calcular un índice de calidad de suelo (ICS), análisis de varianza, prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$), correlación lineal, análisis de conglomerados y correlación canónica. **Resultados:** Mayor cantidad de actinomicetos totales ($>4 \text{ Log UFC g}^{-1} \text{ suelo}$), actinomicetos fijadores de nitrógeno ($>3.8 \text{ Log UFC g}^{-1} \text{ suelo}$) y

† Submitted January 22, 2021 – Accepted March 8, 2021. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.
ISSN: 1870-0462.

hongos (>1.7 Log UFC g^{-1} suelo) se observaron en el sistema MIAF respecto a los monocultivos. Para los sitios con asociación maíz-frijol en el sistema MIAF se observó alta correlación positiva entre contenido de materia orgánica y actinomicetos fijadores de nitrógeno ($r=0.60$) y levaduras ($r=0.73$), así como con el porcentaje de nitrógeno total con las levaduras ($r=0.70$) y actinomicetos fijadores de nitrógeno ($r=0.75$). **Implicaciones:** La metodología utilizada permitió la agrupación de los sitios estudiados, a partir del ICS y de un grupo reducido de variables. **Conclusión:** El sistema MIAF favoreció la abundancia de grupos funcionales, los parámetros de calidad y la disponibilidad de nutrientes en el suelo respecto a los sitios con monocultivo.

Palabras clave: Actinomicetos; hongos; maíz-frijol; manzano; suelo.

INTRODUCCIÓN

La agroecología se muestra como una vía para conservar y optimizar el uso de la biodiversidad en los agroecosistemas (Altieri, 1999), los cuales son ecosistemas modificados por el hombre para obtener un producto o servicio (Altieri *et al.*, 2014). En este sentido, los sistemas agroforestales (SAF) pueden ser considerados como un tipo de agroecosistema compuesto por una biodiversidad silvestre y domesticada (Moreno-Calles *et al.*, 2014), donde árboles se asocian con cultivos agrícolas de manera espacial y temporal, que generan interacciones ecológicas y económicas entre los componentes del sistema, las cuales son compatibles con las condiciones socioculturales (Murgueitio *et al.*, 2006); son sistemas que muestran aportes relevantes como la reducción de la erosión (García *et al.*, 2015), el incremento de la fertilidad del suelo, una producción más estable y resiliente a inundaciones y sequías prolongadas (Gómez, 2014), que en conjunto tienen efectos beneficiosos para el agricultor y el ambiente (Moreno-Calles *et al.*, 2013). Generan implicaciones en la intensificación de las cosechas en espacio y tiempo, brindan beneficios a nivel biológico y agronómico (Muñoz *et al.*, 2017), al igual que en aspectos económicos y sociales (Pocomucha *et al.*, 2016), y son considerados como una expresión de la diversidad y patrimonio biocultural (Moreno-Calles *et al.*, 2014).

En este sentido, la milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) es un tipo de agroecosistema que deriva de un modelo de intensificación de la milpa histórica (MH) desarrollado por productores tradicionales de la región de San Martín Texmelucan-Huejotzingo, en el estado de Puebla, México, donde se intercalan árboles frutales con la milpa. A este modelo se le añaden los beneficios de la tecnología de la terraza de muro vivo para laderas, con el propósito de reducir la erosión hídrica del suelo en terrenos con pendiente (Turrent *et al.*, 2017). El MIAF al igual que cualquier otro SAF es un sistema multiobjetivo, que busca incrementar el ingreso neto y el empleo familiar sin dejar de producir alimentos básicos, y proteger el suelo contra la erosión sin eliminar su roturación, excepto en condiciones especiales (Turrent *et al.*, 2016, Turrent *et al.*, 2017) e incrementar la captura del carbono atmosférico y edáfico (Covaleda *et al.*, 2016).

El suelo es fundamental en el MIAF, debido a que aporta nutrimentos para el desarrollo de las plantas y les brinda soporte (Estrada-Herrera *et al.*, 2017), al menos una de las etapas de los ciclos biogeoquímicos que ocurren en los agroecosistemas tiene lugar en el suelo (León *et al.*, 2011). El papel y las funciones que tienen los microorganismos en el suelo son tan amplios y variados como lo son ellos mismos (Parra-Cota *et al.*, 2018); la ausencia de estas comunidades representaría el colapso de los agroecosistemas (García de Salamone, 2011), ya que ellos brindan servicios ecosistémicos vitales para la sustentabilidad agroalimentaria, y son los principales agentes en procesos ecológicos (FAO, 2019, Soria, 2016). Los atributos de la microbiota edáfica, principalmente los asociados con el flujo de energía y el ciclo de nutrientes, han mostrado ser sensibles a perturbaciones de las condiciones del suelo previo a condiciones físicas y químicas como el carbono oxidable, de manera que la biota microbiana se presenta como un potencial indicador sobre las alteraciones de la calidad del suelo y del agroecosistema (Paolini-Gómez, 2017), ya que la abundancia de microorganismos como las bacterias, hongos y actinomicetos, depende de las condiciones del suelo (Soto *et al.*, 2012).

En el MIAF, y en los agroecosistemas en general, los grupos microbiológicos son sensibles a las condiciones de cultivo, y las prácticas de manejo tienen un impacto en la abundancia de grupos con un papel relevante como las levaduras, hongos (10^4 a 10^6 UFC g^{-1} de suelo seco; donde UFC=Unidad Formadora de Colonias) y actinomicetos (10^6 a 10^7 UFC g^{-1} de suelo seco). Las levaduras tienen participación en el ciclo del carbono al degradar la hemicelulosa y están asociadas con procesos de agregación del suelo (Valenzuela *et al.*, 2014); algunas especies favorecen la simbiosis entre plantas y hongos micorrízicos arbusculares (HMA) (Nelson y Nelson, 2015), uno de los grupos microbianos del suelo más relevantes por las funciones que desarrollan en los agroecosistemas y ecosistemas naturales, y que se asocian con cerca del 90% de las plantas terrestres, en todos los ecosistemas del mundo (Santillana y Toro, 2018, Soto *et al.*, 2012). Los actinomicetos al ser microorganismos heterótrofos saprófitos participan en ciclos biogeoquímicos, producen antibióticos capaces de inhibir el crecimiento de fitopatógenos, al igual que enzimas extracelulares con la facultad de degradar materia orgánica de origen vegetal y animal; además de liberar sideróforos,

sustancias promotoras del crecimiento vegetal *in vitro*, y fomentar la nodulación y asistir a bacterias *Rhizobium* en la absorción de hierro requerido para la fijación de nitrógeno en leguminosas (Franco-Correa, 2009, Pérez-Corral *et al.*, 2015). Los actinomicetos se distribuyen en la capa superficial del suelo, entre 2 y 15 cm de profundidad, y el tamaño de la comunidad es susceptible a cambios físicos y químicos como el contenido de materia orgánica y pH. El género más abundante de este grupo es *Streptomyces*; algunos otros como *Frankia* se han descrito también como fijadores de nitrógeno atmosférico (Franco-Correa, 2009).

El objetivo del presente estudio fue determinar parámetros de calidad de suelo y la abundancia de grupos funcionales de microorganismos edáficos en diferentes sitios contrastantes evaluados en un sistema MIAF y en monocultivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del sitio de estudio

El estudio se realizó en 2018, en una parcela con sistema MIAF establecida en 2004 en la localidad de San Mateo Capultitlán, municipio de Huejotzingo, Puebla, México, en la cual se estudió la asociación maíz (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) intercalada en árboles de manzano (*Malus domestica* Borkh) cv “agua nueva dos” en plena producción. En la región, de acuerdo con la base referencial mundial del recurso suelo de la FAO (WRB por sus siglas en inglés), predominan los suelos tipo Arenosol con 38% (AR), Phaeozem con 26% (PH), Cambisol con 8% (CM), Andosol con 8% (AN) Fluvisol con 4% (FL) y Leptosol con 3% (LP) (IUSS Working Group WRB, 2015; INEGI, 2016), y el clima templado subhúmedo, con precipitación anual entre 900 y 1100 mm y una temperatura entre 5 °C a 25 °C (INAFED, 2016). La parcela se ubica en suelo tipo Fluvisol, en condiciones de temporal, pero cuenta con posibilidades de aplicación de riego de auxilio.

Unidades de estudio en el sistema MIAF y monocultivo

Dentro de la parcela se seleccionaron ocho sitios contrastantes (Tabla 1 y Figura 1); de estos, dos correspondieron al arreglo de maíz y frijol asociado dentro del sistema MIAF, dos con manzano en sistema MIAF, dos con maíz en monocultivo y dos con manzano en monocultivo; se consideró la orientación de los surcos con respecto a la hilera de manzanos como un factor de estudio para los sitios bajo sistema MIAF. En 2018 se registró de manera semanal la temperatura atmosférica y humedad relativa por medio de un higrotermómetro analógico marca Taylor (Mod. 5535-e, México), así como la precipitación con un

pluviómetro portátil marca Taylor (Mod. 2715, México). De igual manera, al momento de realizar los muestreos, se registró la temperatura de suelo con geotermómetro (Mod. 651N105, Argentina).

El muestreo de suelo se realizó en marzo previo a la siembra de 2018, a una profundidad de 0 a 20 cm, de acuerdo con la norma oficial mexicana para muestreo y análisis de suelos (NOM-021-RECNAT-2000). Las muestras compuestas de suelo (n=3), de los sitios indicados en el Tabla 1, están constituidas además por tres muestras simples.

Tabla 1. Sitios de muestreo de suelo en diferentes condiciones de cultivo, San Mateo Capultitlán, Puebla, México 2018.

Sitio	Cultivo	Orientación respecto al árbol	Sistema
AS	Maíz-Frijol	Sur	MIAF
AN	Maíz-Frijol	Norte	MIAF
FMS	Manzano	Sur	MIAF
FMN	Manzano	Norte	MIAF
FSS	Manzano	Sur	Monocultivo
FSN	Manzano	Norte	Monocultivo
MSE	Maíz	N/A	Monocultivo
MSC	Maíz	N/A	Monocultivo

AS: Asociación MIAF sur; AN: Asociación MIAF norte; FMS: Frutal MIAF sur; FMN: Frutal MIAF norte; FSS: Frutal en monocultivo sur; FSN: Frutal en monocultivo norte; MSE: Maíz en monocultivo; MSC: Maíz en monocultivo convencional. Muestras compuestas conformadas por tres muestras simples. Fuente: Elaboración propia.

Análisis físico y químico del suelo de los sitios de estudio

Como variables indicadoras de la calidad de suelo, en las muestras compuestas de los sitios de estudio (Tabla 1), se determinó por triplicado (García *et al.*, 2012): humedad gravimétrica por secado de muestras después de 72 horas a 105°C en estufa (MCO GCA Mod. Precisión) de circulación forzada de aire (NOM-021-RECNAT-2000), densidad aparente por el método de probeta, materia orgánica y carbono oxidable por el método Walkley y Black (NOM-021-RECNAT-2000), cenizas (NMX-AA-18-1984), nitrógeno total por el método Kjeldahl (NOM-021-RECNAT-2000), nitrógeno nítrico y amoniacal por el método micro-Kjeldahl (NOM-021-RECNAT-2000), textura mediante técnica Bouyoucos citado en la norma mexicana NOM-021-RECNAT-2000, conductividad

eléctrica y pH (NOM-021-RECNAT-2000) con un potenciómetro CONDUCTRONIC PC18 y nutrientes en extracto de saturación (NO₃⁻, Na⁺, K⁺ y Ca²⁺) con un kit Laquatwin. La interpretación de los atributos físicos y químicos del suelo partió de los valores de referencia de la norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000.

Análisis microbiológico de suelo y diversidad de arvenses en los sitios de estudio

A las muestras compuestas de suelo por sitio se les determinó por duplicado la abundancia de actinomicetos totales, actinomicetos fijadores de nitrógeno, hongos, levaduras, bacterias totales y esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Los primeros cinco se determinaron por cuenta en placa; con diluciones decimales de 10⁻¹ a 10⁻⁶ elaboradas a partir de una dilución base de 10 g de suelo húmedo de cada muestra en 90 mL de agua peptonada (NOM-110-SSA1-1994). La siembra fue por expansión en superficie en placa, para ello se colocaron 200 µL de la dilución 10⁻³ a 10⁻⁶ sobre el medio de cultivo solidificado y expandiéndolo con ayuda de una espátula Drigalsky. En la determinación de actinomicetos y bacterias totales se utilizó el medio de cultivo agar nutritivo (Evangelista *et al.*, 2017). En actinomicetos fijadores de nitrógeno se utilizó el medio formulado Ashby (Pérez-Corral *et al.* 2015), y para levaduras y hongos el medio de agar papa dextrosa (NOM-111-SSA1-1994). Las bacterias se

incubaron a 37°C; los demás grupos a 28°C, durante 48 horas, a excepción de los hongos que se incubaron por 120 horas. La determinación de esporas de hongos micorrízicos arbusculares se realizó según Alarcón y Ferrera (1999) y De la Rosa-Mera *et al.* (2012), a partir de una dilución de suelo húmedo y agua destilada (12.5:1) de cada muestra, la cual se tamizó y obtuvo el sobrenadante filtrando con papel filtro Whatman No 3. Cada papel filtro se guardó en refrigeración a 4°C, para realizar el conteo posterior de esporas con un microscopio estereoscópico. Con el fin de comparar la abundancia de microorganismos entre los sitios, se consideró como referencia el valor obtenido en el sitio con maíz en monocultivo convencional, de manera que en dicho valor se muestra el eje horizontal de los gráficos.

Se estableció un bioensayo espontaneo de arvenses de acuerdo con Hosoya y Sugiyama (2017), para ello se colocaron 400 mL de perlita y 400 mL de suelo en macetas de plástico de 1000 mL por triplicado por cada sitio de estudio. Inicialmente cada maceta se irrigó con 200 mL de agua corriente, posteriormente se mantuvieron con 150 mL de agua cada tres días para permitir el crecimiento de arvenses, todas las macetas se colocaron en invernadero. Una vez completados 60 días del establecimiento del bioensayo se procedió a cuantificar la abundancia y riqueza de especies de arvenses, para calcular el índice de diversidad de Shannon, de cada muestra (Jiménez-Romero *et al.*, 2020).

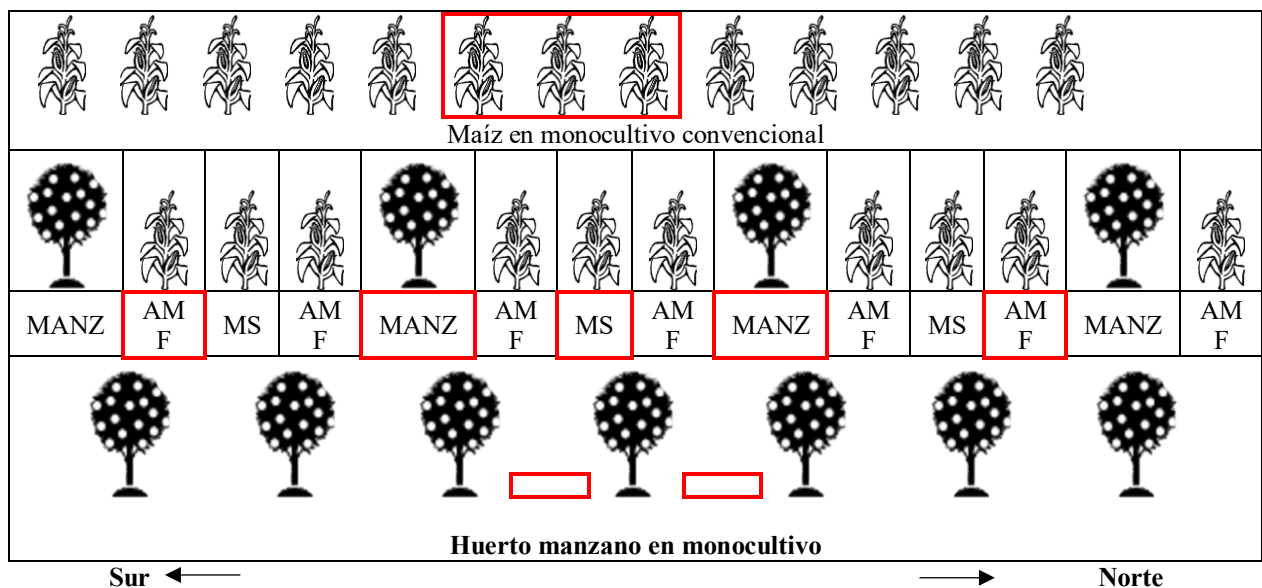


Figura 1. Croquis de la parcela experimental en MIAF y monocultivo. San Mateo Capultitlán, Puebla, México. Nota: En color rojo se indican los sitios muestreados (muestras compuestas de tres muestras simples), los cuales corresponden a los que se mencionan en el Tabla 1. MANZ: Manzanao, AMF: Asociación Maíz-Frijol, MS: Maíz en monocultivo. Sitios por triplicado, n=3. Fuente: Elaboración propia.

Determinación del índice de calidad de suelo

Con base en las variables ya indicadas, se calculó un índice de calidad del suelo por sitio muestreado, de acuerdo con lo propuesto por Andrews *et al.* (2002), para ello se realizaron tres pasos: 1) análisis de componentes principales (ACP) a partir de las variables medidas de suelo, 2) selección de los atributos con mayor varianza, con el fin de establecerlos como variables de análisis y formar un conjunto mínimo de datos (CMD), 3) normalización de las variables con el fin de transformarlas en indicadores, de los cuales se construyó el índice de calidad del suelo (ICS). Para el CMD se tomaron los componentes principales que explicaran al menos 80% de la variabilidad y con un valor propio >1 . Posteriormente se seleccionaron los atributos con mayor aporte de cada uno de los componentes al considerar aquellos con vectores propios $\geq |0.3|$. Una vez determinado el CMD, para definir los indicadores para el ICS y los valores asociados, se utilizó la metodología establecida por Cantú *et al.* (2007), en la cual se establecen límites máximos (I_{\max}) y mínimos (I_{\min}) para cada uno de los atributos seleccionados del CMD. Dado que existen diversas vías para establecer dichos límites en suelos agrícolas, en el presente estudio se establecieron con base en las condiciones ideales para el establecimiento de los cultivos (valor normalizado máximo de cada indicador) y las condiciones edafoclimáticas de la región de estudio.

Los valores de los indicadores fueron normalizados a una escala de 0 a 1 (Tabla 2), el valor máximo del indicador I_{\max} (valor normalizado $V_n = 1$) representa el valor ideal que se busca alcanzar o la situación ideal de calidad del suelo, mientras que el valor mínimo del mismo I_{\min} (valor normalizado $V_n = 0$) refleja la situación de calidad de suelo mínima aceptable (Cantú *et al.*, 2007). Para los datos obtenidos se modificó la escala propuesta por Cantú *et al.* (2007), con base en lo establecido por Estrada-Herrera *et al.* (2017), donde se consideran dos clases adicionales para cada indicador, una clase mayor a la unidad y una menor a cero, esto por el amplio rango de valores que presentaron los indicadores generados para los sitios evaluados en el presente estudio (Tabla 2).

El valor normalizado de los ICS se calculó a través de la siguiente ecuación: $V_n = (I_m - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min})$. 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 CMD

Tabla 2. Clases de calidad de suelo*.

Clases de calidad	Escala
Exceso	1.00 – 1.30
Muy alta calidad	0.80 - 1.00
Alta calidad	0.60 - 0.79
Moderada calidad	0.40 - 0.59
Baja calidad	0.20 - 0.39
Muy baja calidad	0.00 - 0.19
Déficit	-1.00 - 0.00

* De acuerdo con Estrada-Herrera *et al.* (2017)

Análisis estadístico

En el análisis de la información se utilizó el paquete estadístico R (R Core Team, 2018); se realizó un análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) y de diferencia mínima significativa (DMS) para las variables físicas y químicas del suelo, así como análisis de correlación de Pearson para las variables microbiológicas, físicas y químicas. Debido a que los datos de los grupos funcionales de microorganismos edáficos se obtuvieron por conteo en placa, éstos fueron estandarizados aplicando logaritmo natural. También se realizó un análisis de correlación canónica para los atributos físicos y químicos del suelo y para la abundancia de los distintos grupos microbiológicos, además de un análisis de conglomerados con la distancia euclidiana como medida de asociación (Ballesteros-Correa *et al.*, 2019, Bocanegra-González *et al.*, 2015).

RESULTADOS

Variables climatológicas

De acuerdo con el registro de las variables ambientales la temperatura más alta se observó entre los meses de abril y mayo, mientras que la precipitación se distribuyó relativamente homogénea desde mayo hasta septiembre, y de junio a septiembre se presentó la mayor cantidad de lluvia (Figura 2).

Análisis físico y químico del suelo de los sitios en estudio

En las propiedades físicas de suelo se observó diferencia significativa (Tabla 3) entre los sitios para la densidad aparente, teniendo los valores más altos (1.43 g mL^{-1}) los sitios con asociación maíz-frijol con orientación sur y con monocultivo de maíz, y el valor más bajo (0.95 g mL^{-1}) en el sitio con manzano en monocultivo con orientación norte. Los sitios con mayor porcentaje de humedad gravimétrica fueron aquellos con manzano en monocultivo, tanto en orientación sur (13.79%) y norte (14.36%), siendo menor en los sitios con monocultivo de maíz (3.97% y

7.81%). Cabe resaltar los valores obtenidos en los sitios con manzano en sistema MIAF, orientación sur (10.72%) y norte (10.07%).

Se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los sitios muestreados para algunos atributos estudiados como la densidad aparente, humedad gravimétrica, porcentaje de materia orgánica, nitrógeno total y nitrógeno inorgánico (Tabla 3).

Todos los sitios muestreados presentaron valores cercanos a la neutralidad o moderadamente alcalinos (pH entre 7.06 y 7.69). La CE se exhibió con valores depreciables de salinidad en todos los sitios, de manera que el pH y la conductividad no representan un factor limitante para el desarrollo de los cultivos en todos los sitios muestreados; pero resaltan los sitios de manzano en monocultivo con orientación sur y norte con los valores de CE más altos en comparación con el resto de los sitios estudiados (Tabla 3).

Se aprecian (Tabla 3) valores medios en contenido de materia orgánica oxidable en todos los sitios muestreados (1.72% a 2.86%), exceptuando el sitio con monocultivo de maíz convencional, el cual expuso un porcentaje bajo de materia orgánica oxidable (1.05%). Los niveles de nitrógeno inorgánico se exhibieron muy bajos para todos los sitios con manzano, a excepción del sitio con frutal en MIAF con orientación sur, el cual presentó un valor medio (22.17 mg kg⁻¹). Los demás sitios resultaron con valores bajos de nitrógeno inorgánico. El contenido de nitrógeno total fue muy alto (> 0.25%) para los sitios con asociación y frutales en sistema MIAF al igual que en el maíz en monocultivo, los sitios con manzano en monocultivo contaron con valores muy bajos (< 0.05%), y el sitio con maíz en monocultivo convencional indicó un bajo contenido de nitrógeno total (Tabla 3). Se observó que los sitios muestreados

en el sistema MIAF contaron con mejores valores de nitrógeno total y materia orgánica respecto a los monocultivos de maíz.

Análisis microbiológico y de diversidad de arvenses

De los microorganismos edáficos evaluados en el estudio, los hongos contaron con menor abundancia en la mayoría de los sitios muestreados, y destaca con menor representación el sitio con maíz en monocultivo convencional (Figura 3a). Por su lado, las bacterias se evidenciaron como uno de los grupos con mayor variación en los distintos sitios (Figura 3b). La abundancia de actinomicetos totales respecto al sitio con maíz en monocultivo convencional fue superior o similar en los demás sitios evaluados (Figura 3c), al igual que los actinomicetos fijadores de nitrógeno (Figura 3d), con excepción de los sitios con asociación frijol-maíz orientación norte y con frutal en monocultivo orientación sur.

Se observó diferencia en la cantidad de levaduras en los distintos sitios de muestreo, con menor abundancia en los sitios con asociación maíz-frijol y mayor en los sitios con frutal en sistema MIAF (Figura 3e). Los HMA fueron constantes en los distintos sitios evaluados a excepción de aquellos con manzano en sistema MIAF, teniendo mayor abundancia en la condición norte y menor en la sur (Figura 3f), esto puede deberse a la aplicación de fertilizantes minerales, los cuales contribuyen a la cantidad de nitrógeno inorgánico en dicho sitio, así como con la variación entre sitios de la humedad gravimétrica (Tabla 3). El índice de Shannon para la diversidad de arvenses (Figura 3g) fluctuó entre 1 a 2.68, con valores más altos en los sitios con frutales de manzano en sistema MIAF (2.68 para la orientación sur y 2.02 para la norte).

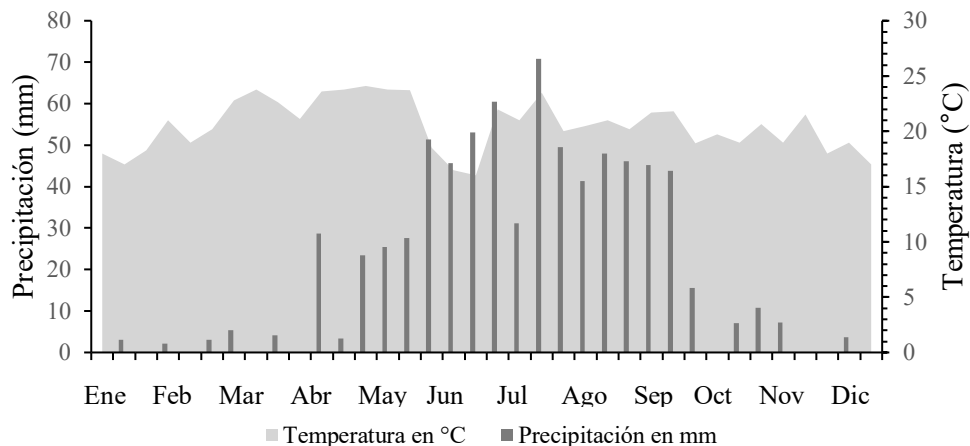


Figura 2. Climograma ciclo 2018 parcela MIAF en San Mateo Capultitlán, Puebla, México. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Análisis de Varianza de propiedades físicas y químicas del suelo de los sitios muestreados en San Mateo Capultitlán, Puebla, México.

Sitio	Densidad (g mL ⁻¹)	Humedad (w%)	pH	C.E. (mS cm ⁻¹)	CO (%)	MOS (%)	Cenizas (%)
AS	1.43 a	4.04 e	7.56 ab	0.56 bc	1.00 ab	1.72 ab	97.59 ab
AN	1.42 a	5.23 de	7.53 ab	0.64 b	1.17 ab	2.02 ab	97.25 abc
FMS	1.19 b	10.72 b	7.63 ab	0.53 bc	1.49 a	2.56 a	96.72 abc
FMN	1.28 b	10.07 bc	7.60 ab	0.69 b	1.40 a	2.42 a	96.47 bc
FSS	1.02 c	13.79 a	7.06 c	1.16 a	1.55 a	2.68 a	95.14 d
FSN	0.95 c	14.36 a	7.47 b	1.01 a	1.28 a	2.20 ab	96.19 cd
MSE	1.43 a	3.97 e	7.56 ab	0.44 c	1.06 ab	1.83 ab	97.62 a
MSC	1.21 b	7.81 cd	7.69 a	0.42 c	0.61 b	1.05 b	96.85 abc
C.V.	2.7478	10.6609	0.9857	9.7052	19.6139	19.6936	0.4107
DMS	0.0964	2.6364	0.2093	0.1872	0.6628	1.147	1.123
ANOVA	1.42e-11***	2.85e-10***	6.16e-07***	1.29e-09***	0.31e-02**	3.28e-03***	1.73e-05***

Sitio	Nt (%)	Ni (mg kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Ca ²⁺ (meq L ⁻¹)
AS	0.39 ab	15.16 ab	136.67 cd	18.61 d	34.72 c	96.67 ab
AN	0.33 ab	18.66 ab	148.56 bcd	19.83 cd	51.61 c	101.83 ab
FMS	0.61 a	22.17 a	155.00 bcd	25.33 abc	34.50 c	95.00 ab
FMN	0.61 a	3.50 b	225.00 abc	28.17 ab	38.17 c	110.00 a
FSS	0.03 b	3.50 b	280.00 a	29.67 a	163.33 a	116.67 a
FSN	0.04 b	9.32 ab	266.67 ab	21.00 cd	98.67 b	85.00 ab
MSE	0.28 ab	16.33 ab	118.33 cd	22.33 bcd	17.17 c	92.00 ab
MSC	0.07 b	15.16 ab	69.67 d	25.67 abc	21.33 c	64.00 b
C.V.	53.2971	50.445	23.9553	9.1984	25.906	16.5608
DMS	0.0044	18.5022	118.4967	6.1954	42.0629	44.5423
ANOVA	7.16e-04***	0.0225*	1.13e-04***	8.17e-05***	2.14e-08***	2.78e-02**

Medias con letra diferente indica diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$, $n = 3$); AS: Asociación MIAF sur; AN: Asociación MIAF norte; FMS: Frutal MIAF sur; FMN: Frutal MIAF norte; FSS: Frutal en monocultivo sur; FSN: Frutal en monocultivo norte; MSE: Maíz en monocultivo; MSC: Maíz en monocultivo convencional; CE: Conductividad eléctrica; MOS: Materia orgánica oxidable; CO: Carbono oxidable; Nt: Nitrógeno total; Ni: Nitrógeno inorgánico; CV: Coeficiente de Variación; DMS: Diferencia Mínima Significativa.

Fuente: Elaboración propia

Análisis de correlación

Las levaduras y los actinomicetos fijadores de nitrógeno se correlacionaron con el porcentaje de materia orgánica, carbono oxidable y nitrógeno total. También se observó una correlación negativa entre las levaduras y hongos con el porcentaje de materia orgánica y carbono del suelo (Tabla 4). Con el análisis de correlación canónica (Figura 4), tras realizar la prueba estadística se observó una correlación positiva con la dimensión dos entre la materia orgánica y la conductividad eléctrica, e inversa con el pH. Los actinomicetos fijadores de nitrógeno se

correlacionaron negativamente con las bacterias en la dimensión uno.

Análisis multivariado e índice de calidad de suelo

Al analizar de manera conjunta la abundancia de grupos microbianos y los parámetros físicos y químicos de suelo para el análisis de conglomerados, se conformaron cinco grupos de sitios muestreados: AS-AN, FMS, FMN-FSN, FSS, MSE-MS (Figura 5). De manera que, se observó cómo los sitios con asociación se diferencian de los sitios con monocultivo de maíz, y todos estos a su vez con los sitios con

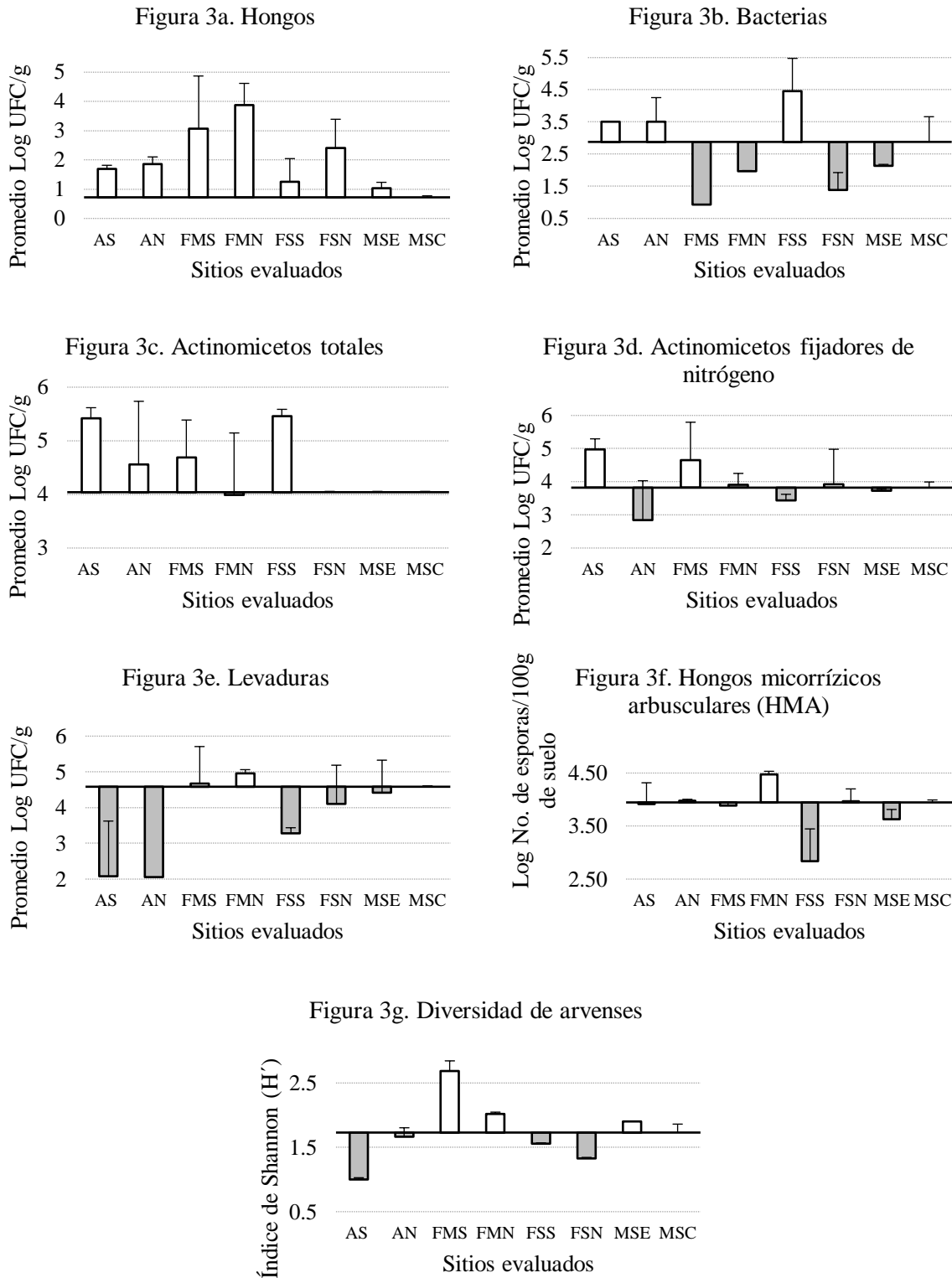


Figura 3. Abundancia de grupos microbianos edáficos y diversidad de arvenses en los sitios muestreados en la localidad de San Mateo Capultitlán, Puebla, México. Se muestra la abundancia de los seis grupos microbiológicos determinados en los ocho sitios de estudio. El eje vertical muestra el valor de Log UFC g⁻¹ de suelo observado en el sitio con monocultivo de maíz convencional. AS: Asociación MIAF sur; AN: Asociación MIAF norte; FMS: Frutal MIAF sur; FMN: Frutal MIAF norte; FSS: Frutal en monocultivo sur; FSN: Frutal en monocultivo norte; MSE: Maíz en monocultivo; MSC: Maíz en monocultivo convencional. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Correlación para cultivos en asociación bajo sistema MIAF en la localidad de San Mateo Capultitlán, Puebla, México.

	Actinomicetos fijadores				
	Actinomicetos totales	de N	Hongos	Levaduras	Bacterias totales
Orientación sur respecto al árbol frutal					
% MOS	-0.09	0.60	-0.20	0.73	-0.25
<i>P</i>	0.73	0.01	0.47	0.001	0.35
% CO	-0.09	0.60	-0.20	0.73	-0.25
<i>P</i>	0.73	0.01	0.47	0.001	0.35
% Nt	0.09	0.25	0.08	0.70	-0.14
<i>P</i>	0.73	0.35	0.76	0.002	0.61
Ni mg kg ⁻¹	-0.57	0.04	-0.14	0.22	0.24
<i>P</i>	0.02	0.87	0.60	0.40	0.37
Orientación norte respecto al árbol frutal					
% MOS	-0.31	0.11	-0.86	-0.80	-0.14
<i>P</i>	0.24	0.73	0.000	0.001	0.61
% CO	-0.31	0.11	-0.86	-0.80	-0.14
<i>P</i>	0.24	0.68	0.000	0.001	0.61
% Nt	-0.30	0.75	-0.12	-0.49	0.03
<i>P</i>	0.26	0.000	0.66	0.002	0.92
Ni mg kg ⁻¹	0.33	-0.68	-0.49	0.03	-0.13
<i>P</i>	0.21	0.004	0.52	0.40	0.62

Se muestra el valor del coeficiente de correlación (r^2) con su valor de significancia ($P \leq 0.05$). MOS: Materia orgánica oxidable; CO: Carbono oxidable; Nt: Nitrógeno total; Ni: Nitrógeno inorgánico. Fuente: Elaboración propia.

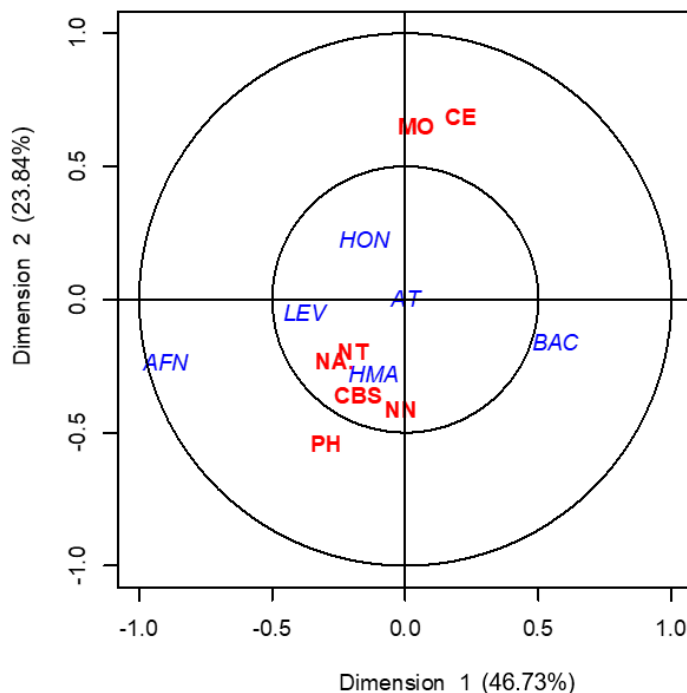


Figura 4. Diagrama de correlaciones para las propiedades físicas, químicas del suelo y la abundancia de microorganismos de los sitios muestreados en la localidad de San Mateo Capultitlán, Puebla, México. AT: Actinomicetos Totales; AFN: Actinomicetos Fijadores de Nitrógeno; HON: Hongos; LEV: Levaduras; BAC: Bacterias Totales; HMA: Hongos Micorrizicos Arbusculares; MOS: Materia orgánica oxidable; CBS: Cenizas Base Seca; pH: Potencial de Hidrógeno; CE: Conductividad Eléctrica; NT: Nitrógeno Total; NA: Nitrógeno Amoniacal; NN: Nitrógeno Nítrico. Fuente: Elaboración propia.

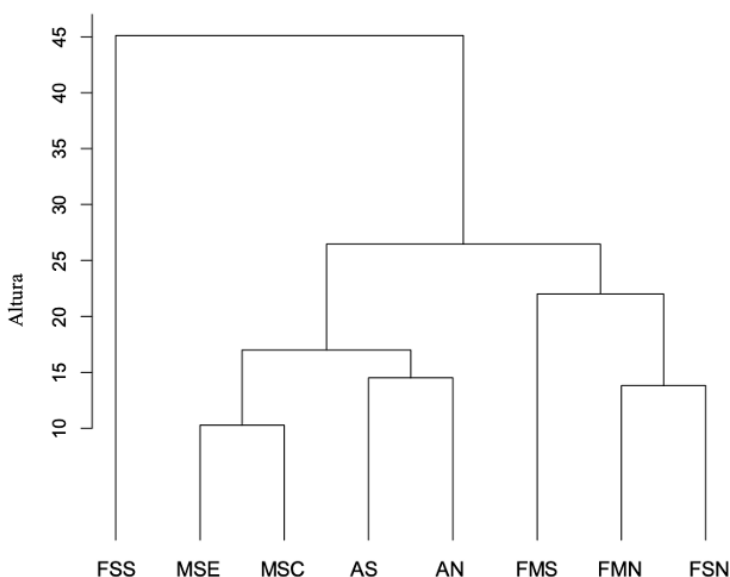


Figura 5. Análisis de Conglomerados para grupos de microorganismos y atributos físicos y químicos del suelo de los sitios muestreados en la localidad de San Mateo Capultitlán, Puebla, México. AS: Asociación MIAF sur; AN: Asociación MIAF norte; FMS: Frutal MIAF sur; FMN: Frutal MIAF norte; FSS: Frutal en monocultivo sur; FSN: Frutal en monocultivo norte; MSE: Maíz en monocultivo; MSC: Maíz en monocultivo convencional. Fuente: Elaboración propia.

árboles frutales, ya sea en sistema MIAF o monocultivo. De manera que, se confirma la agrupación de los sitios con monocultivo o con asociación en el caso del cultivo de maíz, más no para los frutales, ya que los sitios con orientación norte de frutal en sistema MIAF y monocultivo formaron un grupo, mientras que aquellos con orientación sur muestran un comportamiento diferente a los demás, separándose de los grupos principales (Figura 5).

Derivado del ACP se generaron tres componentes que representan el 80.42% de la varianza total de los datos originales (Figura 6). Del primer componente, que representa el 45.06% de la varianza explicada, las variables con mayor contribución son potasio (0.309) conductividad eléctrica (0.308) materia orgánica total (0.307). En el segundo componente (21.61%), los hongos (-0.393), las bacterias totales (0.389), diversidad de arvenses (-0.354), levaduras (-0.348) y nitrógeno total (-0.308) son los atributos del suelo con mayor contribución. Y en el tercer componente (13.75%) el calcio (-0.437), el nitrógeno total (-0.374), los actinomicetos totales (-0.343), las levaduras (0.329) y la densidad aparente (-0.302) mostraron los coeficientes más altos.

El CMD, obtenido tras el ACP, se conformó por 11 indicadores (Tabla 5), con la eliminación del porcentaje de cenizas a base seca porque, a pesar de cumplir con los requisitos para formar parte del CMD, presenta colinealidad con el porcentaje de materia orgánica total (Figura 6). La evaluación de la calidad

de suelo de los sitios muestreados, a partir del número de indicadores mínimos o conjunto mínimo de datos (CMD) seleccionados, así como los valores únicos normalizados derivados para cada sitio evaluado (Tabla 5), mostró que los indicadores que presentaron un menor valor, en promedio para todos los sitios, fueron la abundancia de bacterias totales (0.01) y la abundancia de hongos (0.16), mientras que el valor más alto correspondió a la conductividad eléctrica (0.91), seguida del nitrógeno total (0.62) y la diversidad de arvenses (0.58).

Si bien la mayoría de los sitios evaluados mostraron un índice de calidad de suelo bajo, los sitios con sistema MIAF reflejaron mayores valores del índice de calidad de suelo respecto a los sitios con monocultivo, y destacan los sitios con manzano en sistema MIAF, con una calidad moderada a alta (Tabla 5).

DISCUSIÓN

Dada la importancia de la densidad aparente en el crecimiento y desarrollo de los cultivos, principalmente de las raíces y la captación de humedad por el efecto de la resistencia y la porosidad del suelo (Hossne, 2008), se destaca que los sitios con cultivos anuales, tanto en asociación como monocultivo, presentan una mayor densidad aparente respecto a los sitios con frutal en monocultivo o sistema MIAF, esto puede deberse a procesos de compactación de suelo por el uso cíclico de maquinaria agrícola en los sitios

con cultivos anuales, lo cual no sucede en aquellos con manzano (Tabla 3).

La variación de la densidad aparente y humedad gravimétrica puede explicarse por la cobertura vegetal, como observaron Martínez-González *et al.* (2010), ya que la densidad y la cobertura vegetal influyen en la humedad del suelo al interceptar agua pluvial y radiación solar, a la vez que son un medio de salida de agua del agroecosistema mediante la transpiración; los valores de los sitios con manzano en sistema MIAF, orientación sur (10.72%) y norte (10.07%), pueden deberse a la distribución de raíces de los distintos cultivos componentes del sistema MIAF (Albino-Garduño *et al.*, 2015), teniendo un área de exploración mayor en el sistema MIAF que en monocultivo, y por lo tanto un mayor aprovechamiento de la humedad del suelo.

A la par de los atributos físicos y químicos del suelo, la abundancia de grupos microbiológicos cultivables es crucial para los procesos biogeoquímicos y un buen desarrollo de los cultivos. Los actinomicetos son un

grupo de la microbiota relevante debido al papel que desempeñan en la producción de metabolitos secundarios, degradación de material orgánico y la promoción del crecimiento vegetal (Franco-Correa, 2009, Pérez-Corral *et al.*, 2015), por lo que es interesante observar que la existencia de actinomicetos totales respecto al sitio con maíz en monocultivo convencional fue superior o similar en los demás sitios evaluados (Figura 3c), al igual que los actinomicetos fijadores de nitrógeno (Figura 3d), con excepción de los sitios con asociación frijol-maíz orientación norte y con frutal en monocultivo orientación sur. Yurkov *et al.* (2012) señalan que las levaduras del suelo son sensibles a las prácticas de manejo en suelos agrícolas, como la remoción del suelo y aplicación de agroquímicos, lo cual reduce de manera notable su población. Por su parte Slavikova y Vadkertiova (2003) manifestaron que la abundancia de levaduras disminuye en suelos labrados comparados con suelos no labrados y que pueden asociarse a la aplicación de pesticidas y fungicidas; lo cual puede explicar la abundancia de levaduras en los sitios evaluados (Figura 3e).

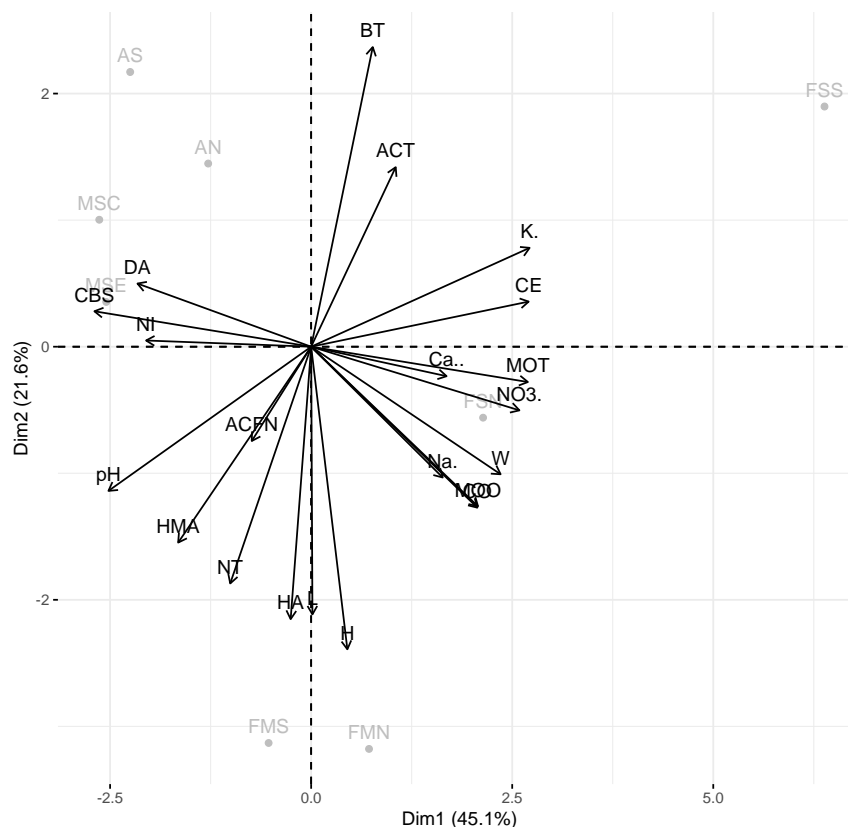


Figura 6. Análisis de componentes principales (ACP) de los atributos físicos, químicos y biológicos del suelo para los sitios muestreados en el sistema MIAF en la localidad de San Mateo Capultitlán, Puebla, México. En color negro se representa las variables físico, químicas y biológicas, en color gris los sitios evaluados bajo distintas condiciones. Entre paréntesis se muestra la varianza explicativa para cada componente. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Indicadores del ICS para los sitios evaluados en la localidad de San Mateo Capultitlán, Puebla, México.

Sitio	MOT	DA	Ca ²⁺	ACT	H	HA	CE	L	NT	K ⁺	BT	Medias
AS	0.28	0.69	0.22	0.36	0.02	0.33	0.97	-0.10	0.85	0.07	0.02	0.34
AN	0.35	0.67	0.24	0.28	0.08	0.55	0.93	-0.10	0.70	0.31	0.00	0.36
FMS	0.46	0.26	0.22	0.54	0.82	0.89	0.99	1.57	1.38	0.06	0.00	0.65
FMN	0.51	0.41	0.26	0.62	0.20	0.67	0.90	0.75	1.38	0.12	0.00	0.53
FSS	0.77	-0.05	0.27	0.95	0.02	0.52	0.67	0.01	-0.03	1.90	0.02	0.46
FSN	0.56	-0.18	0.19	0.23	0.11	0.44	0.75	0.35	-0.01	0.98	0.00	0.31
MSE	0.28	0.69	0.21	0.29	0.07	0.64	1.03	0.15	0.59	-0.18	0.00	0.34
MSC	0.43	0.29	0.14	0.55	0.00	0.58	1.04	0.15	0.06	-0.12	0.00	0.28
ICS Medias	0.45	0.35	0.22	0.48	0.16	0.58	0.91	0.35	0.62	0.39	0.01	0.41

AS: Asociación MIAF sur; AN: Asociación MIAF norte; FMS: Frutal MIAF sur; FMN: Frutal MIAF norte; FSS: Frutal en monocultivo sur; FSN: Frutal en monocultivo norte; MSE: Maíz en monocultivo; MSC: Maíz en monocultivo convencional; MOT: Porcentaje de materia orgánica total; DA: Densidad aparente; Ca²⁺: Calcio; ACT: Abundancia de actinomicetos totales; H: Abundancia de hongos; HA: Índice de diversidad de arvenses; CE: Conductividad eléctrica; L: Abundancia de levaduras; NT: Porcentaje de nitrógeno total; K⁺: Potasio; BT: Abundancia de bacterias totales. Fuente: Elaboración propia.

Los HMA en suelos agrícolas son de particular interés debido a que éstos favorecen el reciclaje de nutrientes al igual que optimizan la fertilización, de manera que se puede reducir el uso de químicos de síntesis para fertilización (Wilches *et al.*, 2019), en los sitios evaluados la abundancia de este grupo se mostró similar (Figura 3f). Respecto a la correlación entre el porcentaje de materia orgánica oxidable, carbono oxidable y nitrógeno total con la abundancia de levaduras y actinomicetos fijadores de nitrógeno (Tabla 4), corresponde a lo indicado por Mantilla-Paredes *et al.* (2009), quienes mencionan la importancia de estos grupos para la dinámica de nutrientes al descomponer materia orgánica y favorecer la mineralización, impactan en la aireación de la capa superficial y mejoran la estructura física del suelo. La correlación entre la materia orgánica y la conductividad eléctrica en los distintos sitios evaluados (Figura 4), corresponde a lo indicado por Simón *et al.* (2013); con una correlación canónica positiva y valores bajos de ambas variables, dependiendo del sitio de estudio.

El análisis multivariado (Figura 5) permitió la agrupación de sitios con características similares relacionadas con parámetros de calidad y microorganismos estudiados en el suelo, con una separación de aquellos sitios con monocultivo de los cultivos en asociación en el sistema MIAF, con excepción del sitio con frutal en monocultivo con orientación sur. En contraste con lo observado por Gómez-González *et al.* (2019), quienes sí indican diferencias en el desarrollo de cultivos de acuerdo con la orientación.

Como se observa en la Figura 6, tras realizar el ACP, las variables con mayor aportación al primer componente principal fueron químicas, destaca la CE por sus valores ponderados que indican una muy alta calidad del suelo (Estrada-Herrera *et al.*, 2017), en la mayoría de los sitios estudiados (Tabla 5), pero que permite la diferenciación de los sitios de frutal en monocultivo con orientación sur y norte con los niveles más altos de CE (Tabla 3) y valores ponderados más bajos; así como la importancia de la materia orgánica y K por su variabilidad y contribución a la separación entre sitios (Tabla 5, Figuras 5 y 6). Lo que en parte concuerda con lo expuesto por Villarreal-Núñez *et al.* (2013), quienes calcularon el índice de calidad de suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá, y encontraron que la materia orgánica es uno de indicadores más importantes al evaluar la calidad de suelo. Por su lado, Navarro *et al.* (2008), destacan al contenido de materia orgánica y la conductividad hidráulica saturada como los indicadores que determinan el rendimiento de los cultivos de maíz, frijol y haba. Mientras que, en el segundo componente los atributos con mayor aporte fueron los biológicos, al respecto Julca-Otiniano *et al.* (2006) comentan que los microorganismos tienen un rol fundamental en distintos procesos del suelo, por lo que es de esperarse que tengan una contribución importante en el ACP.

Los valores del índice de calidad de suelo observados en sitios con sistema MIAF puede ser en parte explicados por el porcentaje de materia orgánica total, con niveles más bajos en sitios con cultivos anuales que con manzano y MIAF. Es común encontrar valores de materia orgánica más altos en cultivos perennes que en anuales según Medina-Méndez *et al.* (2017), debido

a la mayor adición de residuos orgánicos, mediante la agregación de distintas estructuras vegetales, como raíces finas, ramas y hojarasca (Cusack *et al.*, 2009), así como por una menor roturación del suelo (McFarlane *et al.*, 2009).

Los valores de nitrógeno total fueron más altos en sistema MIAF, lo que puede ser explicado por la presencia de leguminosas, las cuales tienen la capacidad de fijación de nitrógeno atmosférico (González *et al.*, 2011); sin embargo, en un sitio con monocultivo de maíz también se obtuvo un valor elevado de nitrógeno total. Fassbender (1987) documentó que es común una variación alta en el contenido de nitrógeno total en suelo (0.2 a 0.7%), lo cual puede explicar los valores obtenidos en los distintos sitios evaluados.

La diversidad de arvenses estimada con el índice de Shannon (Figura 3g) mostró valores que representan una diversidad baja para ecosistemas naturales, no así para los sitios con manzano en sistema MIAF donde alcanzó niveles superiores a dos, lo que indica un buen nivel de diversidad, sin ser elevada, pero parecida a los sistemas naturales (Prieto *et al.*, 2017). Como parámetro de calidad de suelo, en esos mismos sitios la diversidad de arvenses alcanzó un valor ponderado de 0.89, cercano al ideal y con un ICS promedio alrededor de 0.6, en la categoría de moderada a alta calidad de suelo (Estrada-Herrera *et al.*, 2017). Al respecto, autores como Blanco-Valdes (2016) resaltan la importancia de las arvenses en los agroecosistemas, al tener un impacto en la composición e interacciones de la entomofauna y otros grupos clave, así como por su influencia en la estructura y calidad del suelo.

CONCLUSIONES

La población de grupos microbianos beneficiosos, exceptuando las levaduras y los hongos micorrizicos arbusculares, resultaron con mayor abundancia en los sitios de asociación maíz-frijol y manzano en sistema MIAF que aquellos con monocultivo de manzano y maíz. La mayoría de las propiedades físicas y químicas del suelo se manifestaron similares o superiores en los sitios con sistema MIAF respecto los sitios con monocultivo de maíz y manzano.

Las relaciones observadas entre los hongos y levaduras con la materia orgánica oxidable y el carbono oxidable del suelo, así como de los actinomicetos fijadores de nitrógeno con el porcentaje de nitrógeno total y cantidad de nitrógeno mineral, confirman la importancia de estos grupos microbianos en la calidad y fertilidad del suelo.

De acuerdo con el ACP, las variables que más influyen en la calidad del suelo fueron: la conductividad eléctrica y la materia orgánica, potasio, seguidos por la

abundancia de grupos microbianos, la diversidad de arvenses y nitrógeno total. De manera general, los índices más relevantes para la calidad de suelo presentaron valores más altos en los sitios bajo sistema MIAF, comparados con los monocultivos.

El sistema MIAF muestra el potencial de favorecer la población de distintos grupos funcionales de microorganismos edáficos que se asocian con mejoras en las propiedades del suelo.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) por la beca de Doctorado otorgada al primer autor. Así como al Colegio de Postgraduados por el apoyo para la investigación.

Financiamiento. Proyecto: Diversidad edáfica y relaciones productivas de la milpa intercalada con árboles frutales en la región de Huejotzingo, Puebla.

Conflicto de intereses. Los autores declaran no tener conflicto de interés conocido asociado con esta publicación.

Complimiento de estándares de ética. La investigación presenta datos originales que no se envían a otra revista al mismo tiempo. Además, la investigación se realizó de acuerdo con los procedimientos establecidos por el Colegio de Postgraduados.

Disponibilidad de datos. Los datos están disponibles con el autor correspondiente javi_69rey@hotmail.com, y con el primer autor tabaredg@gmail.com, previa solicitud razonable.

REFERENCIAS

- Alarcón, A. y Ferrera-Cerrato, R. 1999. Manejo de la micorriza arbuscular en sistemas de propagación de plantas frutícolas. *Terra Latinoamericana*. 17(3): pp. 179-191. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57317302.pdf>
- Albino-Garduño, R., Turrent-Fernández, A., Cortés-Flores, I., Livera-Muñoz, M. y Mendoza-Castillo, M. 2015. Distribución de raíces y de radiación solar en el dosel de maíz y frijol intercalados. *Agrociencia*. 49(5): pp. 513-531. <http://valoragregado.org/ojsagrociencia/index.php/agrociencia/article/view/1162/1162>
- Altieri, M.A. 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 74: pp. 19-31. <https://www.sciencedirect.com/journal/agric>

- ulture-ecosystems-and-environment/vol/74/issue/1
- Altieri, M.A., Nicholls, C.I. y Montalba, N.R. 2014. El papel de la biodiversidad en la agricultura campesina en América Latina. *LEISA revista de agroecología*. 30(1): pp. 5-8. <http://www.leisa-al.org/web/index.php/volumen-30-numero-1/1014-el-papel-de-la-biodiversidad-en-la-agricultura-campesina-en-america-latina>
- Andrews, S., Karlen, D. and Mitchell, J. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 90(1): pp. 25–45.
- Ballesteros-Correa, J., Morelo-García, L. y 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): págs. 224-234. doi: 10.15446/caldasia.v41n1.71320
- Blanco-Valdes, Y. 2016. El rol de las arvenses como componente en la biodiversidad de los agroecosistemas. *Cultivos Tropicales*. 37(4): págs. 34-56. doi: 10.1314/RG.2.2.10964.19844
- Bocanegra-González, K.T., Fernández-Méndez, F. y 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): pp. 17-40. doi: 10.17151/bccm.2015.19.1.2
- Cantú, M., Becker, A., Bedano, J. y Schiviano, H. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices en la Pampa Argentina. *Ciencia Suelo*. 25: pp. 173-178.
- Covaleda, S., Paz, F. y Ranero, A. 2016. Carbono edáfico en Chiapas: Planteamiento de políticas públicas de mitigación de emisiones. *Terra Latinoamericana*. 34(1): pp. 97-112. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/79>
- Cusack, D.F., Chou, W.W., Yang, W.H., Harmon, M.E. and Silver, W.I., The Lidet Team. 2009. Controls on long-term root and leaf litter decomposition in neotropical forest. *Global Change Biology*. 15: pp. 1339-1355.
- De la Rosa-Mera, C., Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A., Sánchez-Colín, M. y Franco-Ramírez, A. 2012. Aislamiento de consorcios de hongos micorrícicos arbusculares de plantas medicinales y su efecto en el crecimiento de vinca (*Catharanthus roseus*). *Revista chilena de historia natural*. 85(2): pp.187-198. doi: 10.4067/S0716-078X2012000200005
- Estrada-Herrera, I.R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz-Suárez, J.J., Navarro-Garza, H. y Etchevers-Barra, J.D. 2017. Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*. 51(8): pp. 813-831. doi: <https://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2017/nov-dic/art-1.pdf>
- Evangelista, M.Z., Quiñones, A.E. y Rincón, E.G. 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): pp. 39-51. doi: http://www.utm.mx/edi_antiores/temas63/T63_E011-2017.pdf
- Fassbender, H. W. 1987. *Química de Suelos, con énfasis en Suelos de América Latina. 2a Edición*. San José: Costa Rica, pp. 420.
- Franco-Correa, M. 2009. Utilización de los actinomicetos en procesos de biofertilización. *Revista Peruana de Biología*. 16(2): pp. 239-242. doi: 10.15381/rpb.v16i2.213
- García de Salamone, I.E. 2011. Microorganismos del suelo y sustentabilidad de los agroecosistemas. *Revista Argentina de Microbiología*. 43(1): pp. 1-3. <https://www.aam.org.ar/descarga-archivos/43-1completa.pdf>
- García, M.L., Valdez, H.J., Luna, C.M. y López, M.R. 2015. Estructura y diversidad arbórea en sistemas agroforestales de café en la Sierra de Atoyac, Veracruz. *Madera y bosques*. 21(3): pp. 69-82. doi: 10.21829/myb.2015.213457
- García, Y., Ramírez, W. y Sánchez, S. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*. 35(2): pp. 125-138. <https://payfo.ihatuey.cu/index.php?journal=pasto&page=article&op=view&path%5B%5D=1499&path%5B%5D=1084>
- Gómez, W. 2014. El Sistema Agroforestal Quensungual en El Salvador. Estudio de caso. *Multequina*. 23: pp. 55-63. https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/multequina/indice/pdf/23/23_5.pdf

- Gómez-González, A., Reyes-Contreras, J.G., García-Herrera, E.J., Pimentel-López, J. y Silos-Espino, H. 2019. Efecto de orientación y forma de contenedor sobre el crecimiento y desarrollo de chile ancho cultivado en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 22: pp. 43-51. doi: 10.29312/remexca.v0i22.1857
- González, R. H., Domínguez-Gómez, G. T., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M. V., Ramírez-Lozano, R. G., Pando-Moreno, M. and Fernández, C. J. 2011. Litterfall deposition and leaf litter nutrient return in different locations at Northeastern Mexico. *Plant Ecology*. 212: pp. 1747-1757.
- Hosoya, K. and Sugiyama, S. 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: pp. 215-224.
- Hossne, G. 2008. La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. *Terra Latinoamericana*. 26(3): pp. 195-202. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792008000300001
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. 2016. Enciclopedia de los municipios de delegaciones de México, Estado de Puebla. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21074a.html>. Fecha de consulta 12 de enero de 2020.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2016. Edafología. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>. Fecha de consulta 15 de noviembre de 2019.
- IUSS Working Group WRB, 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.
- Jiménez-Romero, E. M., Crespo-Gutiérrez, R. S., Cuaquer-Fuel, E. y Chevez-Alejandro, A. P. 2020. Relación de arvenses en plantaciones *Dectona grandis* L.f. (teca) y su banco de semillas en la zona central del litoral ecuatoriano. *Centro Sur*, 1(7): pp. 69-92
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R. y Bello-Amez, S. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *IDESIA*. 24(1): pp. 49-61.
- León, J.D., González, M.I. y Gallardo, J.F. 2011. Ciclos biogeoquímicos en bosques naturales y plantaciones de coníferas en ecosistemas de alta montaña de Colombia. *Revista de Biología Tropical*. 59(4): pp. 1883-1894. doi: 10.15517/rbt.v59i4
- Mantilla-Paredes, A.J., Cardona, G.I., Peña-Venegas, C.P., Murcia, U., Rodríguez, M. y Zambrano, M.M. 2009. Distribución de bacterias potencialmente fijadores de nitrógeno y su relación con parámetros fisicoquímicos en suelo con tres coberturas vegetales en el sur de la Amazonia colombiana. *Revista de Biología Tropical*. 57(4): pp. 915-927. doi: 10.15517/rbt.v57i4
- Martínez-González, F., Sosa-Pérez, F. y Ortiz-Medel, J. 2010. Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 1(4): pp. 88-103. doi: 10.24850/jtyca-imta
- McFarlane, K.J., Schoenholtz, S.H. and Powers, R.F. 2009. Plantation on management intensity affects belowground carbon and nitrogen storage in Northern California. *Soil Science Journal*. 73: pp. 1020-1032.
- Medina-Méndez, J., Volke-Haller, V., Galvis-Spínola, A., Cortés-Flores, J. I. y Santiago-Cruz, M. J. 2017. Incremento de la materia orgánica del suelo y rendimiento de mango en Luvisoles, Campeche, México. *Agronomía Mesoamericana*. 28(2): pp. 499-508.
- Moreno-Calles, A.I., Toledo, V.M. and Casas, A. 2013. Agroforestry systems of Mexico: A biocultural approach. *Botanical Sciences*. 91(4): pp. 375-398. doi: 10.17129/botsci.419
- Moreno-Calles, A.I., Galicia-Luna, V.J., Casas, A., Toledo, V.M., Vallejo-Ramos, M., Santos-Fita, D. y Camou-Guerrero, A. 2014. La Etnoagroforestería: El estudio de los sistemas agroforestales tradicionales de México. *Etnobiología*. 12(3): pp. 1-16. <https://revistaetnobiologia.mx/index.php/etno/article/view/167/166>
- Muñoz, G.J., Rousseau, G.X., Andrade-Silva, J. y Charles, D.J. 2017. Taxones superiores de hormigas como sustitutos de la riqueza de especies en una cronosecuencia de bosques secundarios, bosque primario y sistemas agroforestales en la Amazonía Oriental, Brasil. *Biología Tropical*. 65(1): pp. 279-291. doi: 10.15517/rbt.v65i1.23526.
- Murgueitio, E., Cuellar, P., Ibrahim, M., Gobbi, J., Cuartas, C.A., Naranjo, J.F., Zapata, A.,

- Mejía, C.E., Zuluaga, A. F. y Casasola, F. 2006. Adopción de Sistemas Agroforestales Pecuarios. *Pastos y Forrajes*. 29(4): pp. 365-381.
<https://payfo.ihatuey.cu/index.php?journal=pasto&page=article&op=view&path%5B%5D=695&path%5B%5D=197>
- Navarro, B. A., Figueroa S. B., Martínez M. M., González C. F. y Osuna C. E. 2008. Indicadores físicos del suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos. *Agricultura técnica en México*, 34(2): pp. 151-158.
- Nelson, J.C. y Nelson, J.M. 2015. Uso y manejo de hongos micorrizicos arbusculares (HMA) y humus de lombriz en tomate (*Solanum lycopersicum* L.), bajo sistema protegido. *Cultivos Tropicales*. 36(1): pp. 55-64. doi: 10.1234/ct.v36i1.940
- Norma Mexicana NMX-AA-18-1984. Protección al ambiente-contaminación de suelo-residuos sólidos municipales-determinación de cenizas. Secretaría de Comercio. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFs/NMX-AA-018-1984.pdf>. Fecha de consulta noviembre de 2017
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Norma oficial mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 31 de diciembre de 2002. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>. Fecha de consulta noviembre de 2017
- Norma Oficial Mexicana NOM-110-SSA1-1994. Bienes y servicios, preparación y dilución de muestras de alimentos para su análisis microbiológico, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 16 de octubre de 1995. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69533.pdf>. Fecha de consulta noviembre de 2017
- Norma Oficial Mexicana NOM-111-SSA1-1994. Bienes y servicios. Métodos para la cuenta de mohos y levaduras en alimentos, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 13 de septiembre de 1995. <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/111ssa14.html>. Fecha de consulta noviembre de 2017
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2019. <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/285729/>. Fecha de consulta agosto de 2019
- Paolini-Gómez, J.E. 2017. Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana*. 36: pp. 13-22. doi: 10.28940/terra.v36i1.257
- Parra-Cota, F.I., Coronel-Acosta, C.B., Amézquita-Avilés, C.F., Santos-Villalobos, S. y Escalante-Martínez, D.I. 2018. Diversidad metabólica de microorganismos edáficos asociados al cultivo de maíz en el Valle del Yaqui, Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 9(2): pp. 431-442. doi: 10.29312/remexca.v9i2.1083
- Pérez-Corral, D.A., García-González, N.Y., Gallegos-Morales, G., Ruíz-Cisneros, M.F., Berlanga-Reyes, D.I. y Ríos-Velasco, C. 2015. Aislamiento de actinomicetos asociados a rizosfera de árboles de manzano antagonísticos a *Fusarium equiseti*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6(7): pp. 1629-1638. doi: 10.29312/remexca.v6i7.555
- Pocomucha, V.S., Alegre, J. y Abrego, L. 2016. Análisis socio económico y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Huánuco. *Ecología aplicada*. 15(2): pp. 107-114. doi: 10.21704/rea.v15i2.750
- Prieto, S.M., Molina, B.V. y Dueñas, D. 2017. Evaluación de dos índices de diversidad para definir sustentabilidad biológica en una finca agrícola, del canton Urdaneta. *Revista FADMI*. 1(1): pp. 25-35.
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Santillana, N. y Toro, M. 2018. Asociación micorrizica arbuscular en pastizales de la Comunidad Alto andina de Ccarhuaccpampa – Ayacucho. *Ecología Aplicada*. 17(2): pp. 165-169. doi: 10.21704/rea.v17i2.1236
- Simón, M., Peralta, N. y Costa, J.L. 2013. Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Ciencias del Suelo*. 31(1): pp. 45-55. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4345923>
- Sláviková, E. and Vadkertiová, R. 2003. The diversity of yeasts in the agricultural soil. *Journal of Basic Microbiology*. 43(5): pp. 430-436. doi: 10.1002/jobm.200310277

- Soria, M.A. 2016. ¿Por qué son importantes los microorganismos del suelo para la agricultura? *Química Viva*. 15(2): pp. 3-10. <http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/v15n2/E0037.pdf>
- Soto, A.H., Zavala, H.J., Pérez, M.J. y Camargo, R.S. 2012. Estacionalidad de bacterias y hongos en la rizósfera de dos especies de plantas del Valle semiárido de Zapotitlán, Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 3(6): pp. 1231-1245. doi: 10.29312/remexca.v3i6.1374
- Turrent-Fernández, A., Cortés-Flores, J., Espinosa-Calderón, A., Turrent-Thompson, C. y Mejía-Andrade, H. 2016. Cambio climático y algunas estrategias agrícolas para fortalecer la seguridad alimentaria de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 7(7): pp. 1727-1739. doi: 10.29312/remexca.v7i7.165
- Turrent, F.A., Cortés, F.J., Espinosa, C.A., Hernández, R.E., Camas, G.R., Torres, Z.J. y Zambada, M.A. 2017. MasAgro o MIAF ¿Cuál es la opción para modernizar sustentablemente la agricultura tradicional de México? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8(5): pp. 1169-1185. doi: 10.29312/remexca.v8i5.116
- Valenzuela, E.F., Díaz, P.N., Aranda, C.G., Martínez, O.V. y Godoy, R.B. 2014. Cultivo de cepas de levaduras de suelo trumao en Vinaza. *Boletín Micológico*. 29(2): pp. 56-62. doi: 10.22370/bolmicol.2014.29.2.867
- Villarreal-Núñez, J., Pla-Sentis, I., Agudo-Martínez, L., Villaláz-Perez, J., Rosales, F. y Pocasangre, L. 2013. Índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá. *Agronomía Mesoamericana*, 24(2), pp. 301-315.
- Wilches, O.W., Ramírez, G.M., Pérez, M.U., Serralde, O.D., Peñaranda, R.A. y Ramírez, L. 2019. Asociación de hongos micorrizicos arbusculares (HMA) con plantas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para la producción de panela en Colombia. *Terra Latinoamericana*. 37: pp. 175-184. doi: 10.28940/terra.v37i2.481
- Yurkov. A.M., Kemler, M. and Begerow, D. 2012. Assessment of yeast diversity in soils under different management regimes. *Fungal ecology*. 5: pp. 24-35. doi: 10.1016/j.funeco.2011.07.004