

Caracterización de proteínas del suelo relacionadas con las fracciones de glomalina en cafetales bajo sombra en Veracruz

Rosa María Arias Mota*¹ , Yadeneyro de la Cruz Elizondo² , Yakelin Rodríguez Yon³ 

¹Instituto Tecnológico Superior de Xalapa. Reserva Territorial SN, Col. Santa Bárbara, Xalapa, Veracruz, México. ²Facultad de Biología. Universidad Veracruzana. Campus Xalapa, circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n. CP 91090 Zona Universitaria Xalapa, Ver. México. ³Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Carretera a Tapaste, km 3½, CP 32700, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba.

*Email autor correspondal: rosa.am@xalapa.tecnm.mx

Recibido: 24 abril 2022. **Aceptado:** 14 junio 2022

RESUMEN

Antecedentes: La estructura vegetal de los cafetales con sombra ha funcionado como nicho de la biota nativa. Entre esta biota destacan los hongos micorrízicos arbusculares que forman simbiosis con las plantas y liberan una glicoproteína llamada glomalina que contribuye a la reserva de carbono en los suelos. **Objetivo:** Caracterizar los niveles de las fracciones de proteínas del suelo relacionadas a glomalina total y fácilmente extraíble y analizar su relación con el número de esporas de los hongos micorrízicos arbusculares y con algunas características fisicoquímicas de los suelos cafetaleros. **Métodos:** Se analizaron suelos de cinco cafetales bajo sombra y se utilizaron diferentes métodos extractivos, seguido de la estimación de la concentración de proteínas para la determinación de glomalina y un conteo de esporas de los hongos micorrízicos arbusculares. **Resultados y discusión:** Los valores de glomalina fácilmente extraíble y total oscilaron entre 0.15- a 0.46 y 0.57-2.03 mg/kg respectivamente. La finca Jilotepec1 presentó los mayores valores de las dos fracciones de glomalina. Las regresiones lineales revelaron una relación significativa positiva entre la glomalina total con la materia orgánica, con el carbono orgánico, con el nitrógeno y carbono total. Se observó una relación significativa negativa de la glomalina total con el fósforo disponible y la densidad aparente del suelo. No obstante que no se observó una relación significativa entre la glomalina con el número de esporas, se denota una tendencia, de tal manera que es factible utilizar la medición de glomalina para cuantificar la actividad de los hongos micorrízicos arbusculares en las fincas cafetaleras.

Palabras clave: agroecosistema; esporas; hongos micorrízicos arbusculares.

ABSTRACT

Background: The vegetal structure of coffee plantation under shadow has functioned as niche of native biota. Among this biota, its highlight arbuscular mycorrhizal fungi that form symbiosis with these plants and release a glycoprotein named glomalin which contributes to the carbon reserve in soils.

Objective: To characterize the levels of the fractions of glomalin-related soil proteins and easy extractable and their relationship with the number of arbuscular mycorrhizal fungi spores and several

physic-chemical characteristics of coffee soils. **Methods:** Soils of five coffee plantations under shadow with the same management were analyzed. Different extractive methods were used, followed by the protein-concentration estimation to determine glomalin and the arbuscular mycorrhizal fungi spores counting was achieved.

Results and discussion: Easily extractable and total glomalin values ranged from 0.15-0.46 and 0.57-2.03 mg/kg, respectively. The Jilotepec1 coffee plantation presented the highest values of the two glomalin fractions. Linear regressions revealed a significant positive relationship between total glomalin with organic matter, organic carbon, and total nitrogen and carbon.

A significant negative relationship of total glomalin with soil available phosphorus and soil bulk density. Although a significant relationship between glomalin and the number of spores was not observed, a trend is denoted, in such a way that glomalin can be used to quantify the activity of

arbuscular mycorrhizal fungi in coffee plantations.

Keywords: agroecosystem; spores; arbuscular mycorrhizal fungi.

INTRODUCCIÓN

El café es considerado un cultivo prioritario en México, con cadenas productivas integradas y generación de empleo tanto para mexicanos como para migrantes centroamericanos. El café es fundamental para el sustento de muchos pequeños productores, el 90% de los caficultores son de pequeña escala, es decir, tienen menos de 2 ha y el 65% pertenecen a municipios con población indígena y el 37% son mujeres. México es el décimo mayor productor de café y representa más del dos por ciento de la producción mundial. Se produce en 14 estados, concentrados en el centro y sur del

país, donde el estado de Chiapas representa casi el 40 por ciento de la producción nacional, seguido por Veracruz y Puebla con 24 y 17%, respectivamente [1]. La distribución del café en México es muy amplia, se extiende desde los 300 hasta los 2000 msnm, se produce generalmente en las vertientes de las cadenas montañosas del centro y sur del país por pequeños productores, generalmente de comunidades indígenas o mestizas. Tanto la estructura como la ubicación geográfica de las fincas de café de sombra en México hacen que este tipo de agroecosistemas sean importantes en la conservación de la biodiversidad

mexicana [2]. Los cafetales bajo sombra son de gran importancia por los múltiples servicios ecosistémicos que ofrecen como captadores y reservas de agua, de humedad y de carbono en los suelos [2, 3, 4, 5]. Numerosos estudios [6] argumentan que la estructura vegetal de los cafetales bajo sombra es muy parecida a la de los bosques nativos y han demostrado que, en contraste con otros usos del suelo, el cultivo tradicional de café reemplaza parcialmente el bosque original y por ello conserva la biodiversidad del bosque mesófilo; de manera que han funcionado como corredores o albergues de la biota nativa, así como reservorio de hongos saprobios y hongos micorrízicos [7, 8].

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son asociaciones mutualistas que se establecen entre hongos del Phylum Glomeromycota y las raíces de las plantas superiores. Esta asociación se presenta en aproximadamente el 80% de las familias de las plantas existentes [9, 10, 11]. Los HMA influyen en la composición, la productividad y la diversidad vegetal [12, 13]. Estos hongos actúan como extensiones del sistema radical y aumentan la asimilación de nutrientes del suelo, principalmente fósforo, debido a que las hifas les permiten explorar un mayor volumen del ambiente edáfico [14] y su efecto se puede observar en la planta hospedera, al incrementarse su reproducción, supervivencia y producción de biomasa [15]. Los HMA influyen además en la estructura del suelo mediante la formación y estabilización de agregados de partículas por medio de la formación de redes de hifas [16, 17]. Las hifas

desempeñan una función muy importante en la agregación del suelo, debido principalmente a dos mecanismos: una acción mecánica, que participa en la unión de partículas, y una acción cementante especialmente por la presencia de polisacáridos extracelulares [18]. Uno de estos productos fúngicos es la glomalina [19], proteína que participa en la estabilidad de los agregados del suelo y actúa como reservorio de carbono y nitrógeno. El establecimiento y funcionalidad de los HMA, y por tanto la producción de glomalina, se ve limitada en suelos donde se aplican prácticas convencionales en la agricultura como el uso de agroquímicos [20]. La glomalina es recalcitrante pudiendo durar en los suelos de 7 a 42 años según las condiciones ambientales, el ecosistema y el manejo agrícola de los suelos [21], la presencia de esta glicoproteína puede indicar la acumulación del C en los suelos y la estabilidad de los agregados del suelo [22, 23]. Asimismo, contribuye en el secuestro de metales como Cu y Zn [24]. En la mayoría de los estudios, se incluyen las mediciones de las dos fracciones de glomalina, la fácilmente extraíble y la fracción total; la primera se considera de más reciente producción, es decir representa la fracción más fresca incluso, se ha sugerido que proviene de la descomposición parcial de la glomalina más estable. Por otro lado, la glomalina total se produce, libera y acumula por un período mayor de tiempo, por lo que registra la historia de uso del suelo más que efectos inmediatos de cambio de manejo. Este estudio se realizó con el objetivo de caracterizar los niveles de las dos fracciones de

glomalina (total y fácilmente extraíble) en cinco fincas cafetaleras del estado de Veracruz y relacionar los niveles de esta proteína tanto con el número de esporas de HMA presentes, así como con las características fisicoquímicas de los suelos de los cafetales.

METODOLOGÍA

Sitios de estudio

Los sitios de estudio se ubican en el centro del estado de Veracruz (México), en las localidades de Jilotepec, San Marcos de León y Tuzamapan. Para este estudio, se seleccionaron cinco fincas de café bajo sombra que reciben un manejo tradicional y con plantas de *Coffea arabica* var. costa rica (Figura 1). Las características de cada uno de los sitios se concentran en la tabla 1.

Muestreo

Se realizó un muestreo de suelo rizosférico en mayo del 2021 en las cinco fincas cafetaleras. En cada finca, se establecieron cinco puntos de

muestreo, cada uno separado por una distancia de 50 m con el fin de asegurar que fuesen puntos independientes. En cada punto se consideró como centro una planta de café, a partir de la cual se definieron dos ejes de 1 m; uno norte-sur y otro oriente-occidente; en el extremo de cada eje se tomó una muestra de suelo de 250g a una profundidad de 0-15 cm. El suelo rizosférico se secó a temperatura ambiente y se almacenó a 5°C hasta su procesamiento para la cuantificación de esporas de HMA, glomalina total, glomalina fácilmente extraíble y los análisis fisicoquímicos.

Extracción y conteo del número de esporas de los HMA

Las esporas de los HMA se separaron por el método de tamizado húmedo y decantación [25]. Para ello se colocaron 50 g de suelo rizosférico en un matraz con 250 mL de agua, la muestra se agitó vigorosamente por 10 minutos.

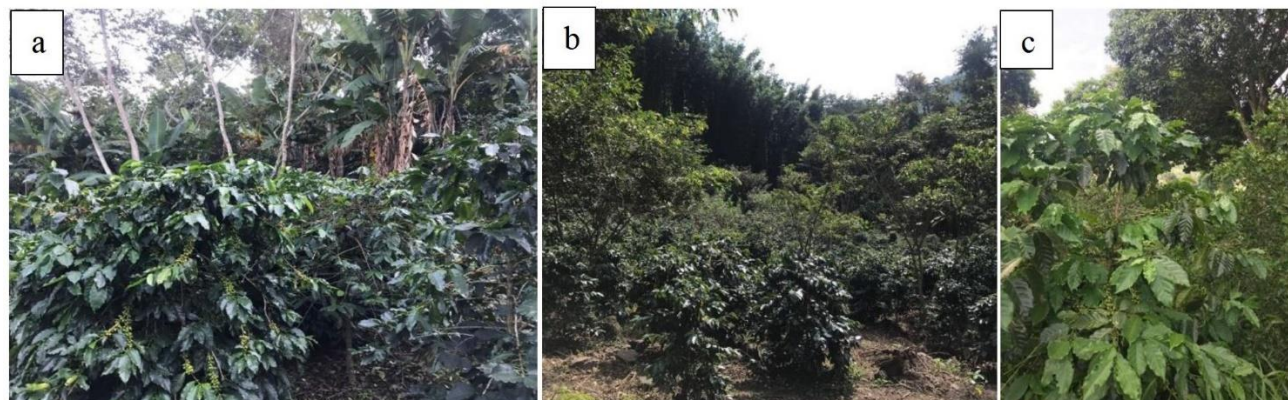


Figura 1. Fincas cafetaleras seleccionadas del centro del estado de Veracruz; a) Jilotepec1, b) Jilotepec2 y c) Tuzamapan.

Tabla 1. Precipitación media anual, localización geográfica, altitud, temperatura y el tipo de manejo que reciben los cafetales.

| Sitios | Precipitación media anual (mm) | Latitud | Longitud | Altitud (msnm) | Temperatura (°C) | Tipo de manejo | Descripción |
|-------------------|--------------------------------|---------------|---------------|----------------|------------------|-------------------------|---|
| <i>Jilotepec1</i> | 1636 | 19°36'42.74'' | 96°56'16.01'' | 1230 | 19.4 | Policultivo tradicional | Aplican compostas y fertilizantes NPK 2 veces/año. Manejo de arvenses por chapeo. |
| <i>Jilotepec2</i> | 1636 | 19°36'38.07'' | 96°55'40.57'' | 1350 | 19.4 | Policultivo tradicional | Aplican fertilizantes NPK 3-4 veces/año. Manejo de arvenses por chapeo. |
| <i>Jilotepec3</i> | 1636 | 19°36'12.15'' | 96°54'44.91'' | 1295 | 19.4 | Policultivo tradicional | Aplican fertilizantes NPK 1 vez/año. Manejo de arvenses por chapeo. |
| <i>Tuzamapan</i> | 1125 | 19°38'43.01'' | 96°84'82.25'' | 650 | 27 | Policultivo tradicional | No se aplican fertilizantes. Manejo de arvenses por chapeo. |
| <i>San Marcos</i> | 1361 | 19°25'34'' | 96°58'08'' | 1099 | 21 | Policultivo tradicional | No se aplican fertilizantes. Manejo de arvenses por chapeo. |

Posteriormente se dejaron en reposo por 10-15 minutos. El sobrenadante obtenido se pasó a través de una serie de tamices Tyler de 750, 250, 150 y 50 µm de apertura. El sobrenadante del último tamiz se colocó en tubos falcón y se aforó a 50 mL para posteriormente centrifugar (Centrífuga Thermo Ice Centra CL2) la muestra

a 2000 rpm durante 5 minutos. Una vez centrifugadas las muestras, se decantaron y se le agregó una solución de sacarosa al 70%. Después de agitar vigorosamente la muestra se centrifugó nuevamente a 2500 rpm durante 1 minuto. El sobrenadante se pasó sobre el tamiz de 50 µm y se lavó con agua corriente, posteriormente se colocó la muestra en una caja

de Petri para contar el número de esporas bajo un microscopio estereoscópico (Carl Zeiss).

Extracción de glomalina fácilmente extraíble y total

Para la extracción de la proteína glomalina fácilmente extraíble (GFE) se utilizó la metodología de Wright y Upadhyaya [26]. Para ello, se pesaron 1 g de suelo rizosférico de cada finca con cinco repeticiones y se colocaron en tubos de ensayo; se le añadieron 8 mL de citrato de sodio (20mM, pH 7) y se colocaron en autoclave durante 30 minutos a 121°C. Se dejaron enfriar y se centrifugaron (Centrífuga Thermo Ice Centra CL2) a 3000 rpm por 15 minutos. Se colectaron los sobrenadantes y se les midió el volumen. El procedimiento de extracción de la glomalina total (GT) consistió en ciclos sucesivos en autoclave (121°C) por 60 minutos, usando buffer citrato 50 mM a pH 8.0 hasta que el sobrenadante no presentó color (aproximadamente seis ciclos). Los sobrenadantes colectados por muestra se unieron y se les midió el volumen. Posteriormente, para la determinación de GT y la GFE se procedió a la evaluación de la concentración de proteínas en los sobrenadantes por el método de Bradford [26], la lectura de absorbancia del complejo proteína azul de coomassie brillante G-250 se realizó a 595 nm en un espectrofotómetro (Thermo UV Vis GENESYS). Se preparó una curva patrón de albúmina de suero bovino a partir de una solución de 1 gL⁻¹, utilizando seis concentraciones de esta solución entre 0.05-0.5

gL⁻¹. Las concentraciones de glomalina se expresaron en mg/kg de suelo seco.

Análisis fisicoquímicos de los suelos

Los análisis fisicoquímicos del suelo rizosférico de las fincas cafetaleras se realizaron de acuerdo con la NOM 021-RECNAT-2000 [28]. La materia orgánica (MO) y el carbono orgánico (CO) se cuantificaron por el método de Walkley-Black modificado, el pH por el método electrométrico, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) con acetato de amonio 1N (pH 7.0), el nitrógeno total por micro-Kjeldahl, el fósforo disponible (P) por Bray Kurtz1 y el fósforo retenido se cuantificó por el método de Blakemore. Los análisis se realizaron en el Laboratorio de análisis de suelos, plantas y agua del Instituto de Ecología, A.C.

Análisis estadísticos

Se llevaron a cabo análisis de varianza de una vía, después de comprobar el supuesto de distribución normal y homogeneidad de varianza de los datos mediante pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Bartlett, respectivamente. Las variables de respuesta se analizaron con el software Statistica [28]. En los casos donde se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre las fincas, se realizaron pruebas de comparación de medias (Tukey HSD). Para estimar las relaciones entre las variables fisicoquímicas del suelo y los contenidos de las dos fracciones de glomalina evaluadas (fácilmente extraíble y total) se

realizaron análisis de regresión lineal simple con nivel de significancia $p \leq 0.05$.

RESULTADOS

Número de esporas de HMA

El número de esporas de HMA contabilizadas en los suelos de las fincas cafetaleras oscilo entre de 89 a 206. El mayor número de esporas se detectó en las fincas San Marcos y Tuzamapan seguidas de la finca de Jilotepec1 y Jilotepec3; el menor número de esporas se distinguió en la finca de Jilotepec2 (Tabla 2).

Glomalina fácilmente extraíble y total

En este estudio, los valores de glomalina fácilmente extraíble (GFE) oscilaron entre 0.15 a 0.46 mg/kg (Tabla 2), las diferencias entre las fincas analizadas resultaron significativas ($F=$

15.79, $p < 0.05$). El mayor contenido de GFE fue en las fincas de Jilotepec1, Tuzamapan y Jilotepec2 ($p < 0.05$). La finca de Jilotepec2 mostró valores muy similares con la finca de Jilotepec3 y San Marcos, siendo estas últimas dos las que presentaron el menor contenido de la glicoproteína GFE.

En cuanto al contenido de glomalina total (GT), los valores fueron más altos que la GFE, estos variaron en el rango de 0.56-2.0 mg/kg de suelo (Tabla 2). En este caso, la finca de Jilotepec1 presentó valores significativamente mayores ($p < 0.05$) que el resto de las fincas (Jilotepec2, Jilotepec3, Tuzamapan y San Marcos). Las fincas de Tuzamapan y San Marcos reflejaron valores intermedios en el contenido de GT y las fincas Jilotepec2 y Jilotepec3 mostraron los valores inferiores, no existiendo diferencias significativas entre estas ($p > 0.05$).

Tabla 2. Contenido de la fracción de glomalina fácilmente extraíble (GFE), fracción de glomalina total (GT) y el número de esporas de Hongos micorrízicos arbusculares (HMA) entre las diferentes fincas cafetaleras.

| Fincas cafetaleras | GFE (mg/kg) | GT (mg/kg) | Número de esporas de HMA/ 50 g suelo |
|--------------------|----------------|----------------|--------------------------------------|
| Jilotepec1 | 0.46 ± 0.02 a | 2.03 ± 0.05 a | 132 |
| Jilotepec2 | 0.28 ± 0.09 ab | 0.57 ± 0.08 c | 89 |
| Jilotepec3 | 0.27 ± 0.02 b | 0.62 ± 0.06 c | 130 |
| Tuzamapan | 0.43 ± 0.05 a | 1.33 ± 0.004 b | 195 |
| San Marcos | 0.15 ± 0.05 b | 1.60 ± 0.19 b | 200 |

Los datos son el promedio de 3 repeticiones ± desviación estándar. Letras idénticas en las columnas indican que no existen diferencias significativas entre las fincas $p < 0.05$

Características fisicoquímicas de los suelos

Los datos de las características fisicoquímicas de los suelos de las fincas se presentan en la tabla 3. Se aprecia que el pH varía de 5.3 en la finca de Tuzamapan con suelo vertisol hasta 6.69 en una de las fincas de Jilotepec (Jilotepec1, Jilotepec2 y Jilotepec3) con suelo andosol. Según la NOM 021 RECNAT 2000 [28], la mayoría de los valores se ubican en la clasificación moderadamente ácido (5.1-6.5) con excepción de la finca jilotepec2 cuyo valor (6.69) es clasificado como neutro. Respecto al fósforo (P) disponible, este presenta valores muy disimiles, variando desde 5.2 mg/kg en una finca de Jilotepec1 y 6.62 mg/kg en San Marcos, hasta valores entre 11-14 mg/kg en las tres fincas restantes (Jilotepec2, Jilotepec3 y Tuzamapan). Por otra parte, el P retenido, la capacidad de campo (CC) y la densidad aparente presentaron valores muy similares entre las fincas a pesar de la diferencia en el tipo de suelo, de la altitud sobre el nivel del mar y condiciones climáticas. La mayoría de los suelos tienen una densidad aparente dentro de la categoría de suelos orgánicos y volcánicos, lo

que resulta en un mayor ingreso de aire al ambiente edáfico y mejor circulación del agua. La materia orgánica (MO) y el carbono orgánico (CO) variaron entre las fincas muestreadas desde valores muy bajos (Jilotepec2) hasta valores altos como el caso de la finca Jilotepec1, esto según la NOM 021 RECNAT 2000 [28]. La mayoría de las fincas tuvieron valores similares en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) con excepción de Tuzamapan que presentó el valor más bajo. La mayoría de los suelos tienen una alta proporción de arcillas a excepción del suelo de Jilotepec1.

Relación entre las variables

Respecto a las regresiones lineales entre las variables. No se observó una relación significativa ($p>0.05$) entre el número de esporas y el contenido de las fracciones de glomalina (GT y GFE); no obstante, se detecta una ligera tendencia (Figura 2a). En las fincas de Jilotepec1 y San Marcos donde denota un mayor número de esporas también se revela un

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas del suelo de las fincas cafetaleras estudiadas: pH, fósforo disponible Bray-Kurtz (P. Disp.), fósforo retenido (P retenido), materia orgánica, carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico (CIC), capacidad de campo (CC), densidad aparente, arcilla, limo, arena, textura, carbono total (C), nitrógeno (N) y tipo de suelo.

| Fincas cafetaleras | pH | P Disp. | P retenido | Materia orgánica | Carbono orgánico | CIC com/kg acetato de amonio | CC | Densidad aparente | Arcilla | Limo | Arena | Textura | C | N | Tipo de suelo |
|--------------------|---------|---------|------------|------------------|------------------|------------------------------|--------|-------------------|---------|-------|-------|------------------|-----|------|---------------|
| | 1:2 H2O | mg/Kg | | % | | IN pH7 | % Hum. | g/cm3 | % | | | | % | | |
| Jilotepec1 | 6.11 | 5.2 | 87.35 | 12.46 | 7.23 | 27.09 | 31.72 | 0.893 | 29.8 | 30.56 | 39.64 | Franco arcillosa | 8.5 | 0.72 | Andisol |
| Jilotepec2 | 6.69 | 14.35 | 89.8 | 3.93 | 2.28 | 20.88 | 22.69 | 1.016 | 45.8 | 22.56 | 31.64 | Arcilla | 2.9 | 0.27 | Andisol |
| Jilotepec3 | 5.43 | 13.56 | 81.63 | 4.72 | 2.74 | 21.51 | 21.62 | 0.994 | 49.8 | 28.56 | 21.64 | Arcilla | 3.5 | 0.27 | Andisol |
| Tuzamapan | 5.31 | 11.72 | 86.94 | 7.15 | 4.15 | 14.31 | 21.9 | 0.918 | 41.8 | 26.56 | 31.64 | Arcilla | 4.7 | 0.42 | Vertisol |
| San Marcos | 5.7 | 6.62 | 88.72 | 9.99 | 5.79 | 24.12 | 29.06 | 0.899 | 49.8 | 27.56 | 22.64 | Arcilla | 5.9 | 0.51 | Luvisol |

mayor contenido de glomalina fácilmente extraíble (GFE) y total (GT). En las fincas Jilotepec2 y Jilotepec3 donde se detectó el menor número de esporas, se observó el menor contenido de glomalina fácilmente extraíble (GFE) y de glomalina total (GT). Se detectó una relación negativa del contenido de la glomalina total con el contenido de fósforo disponible 90% ($p < 0.05$) y con la densidad aparente 91.8% ($p < 0.05$) (Figura 2b y 2c). A mayor fósforo disponible y mayor densidad aparente en los suelos, la glomalina total fue menor. Se detectaron también relaciones significativas positivas de la glomalina total con otras variables fisicoquímicas del suelo. Con la materia orgánica se detectó un 98% ($p < 0.05$) (Figura 2d), de forma similar se encontró relación con el carbono orgánico 98% ($p < 0.05$) (Figura 2e), con el porcentaje de carbono total 96% ($p < 0.05$) (Figura 2f) y con el nitrógeno 97% ($p < 0.05$) (Figura 2g). La glomalina fácilmente extraíble no se relacionó significativamente con ninguna de las variables.

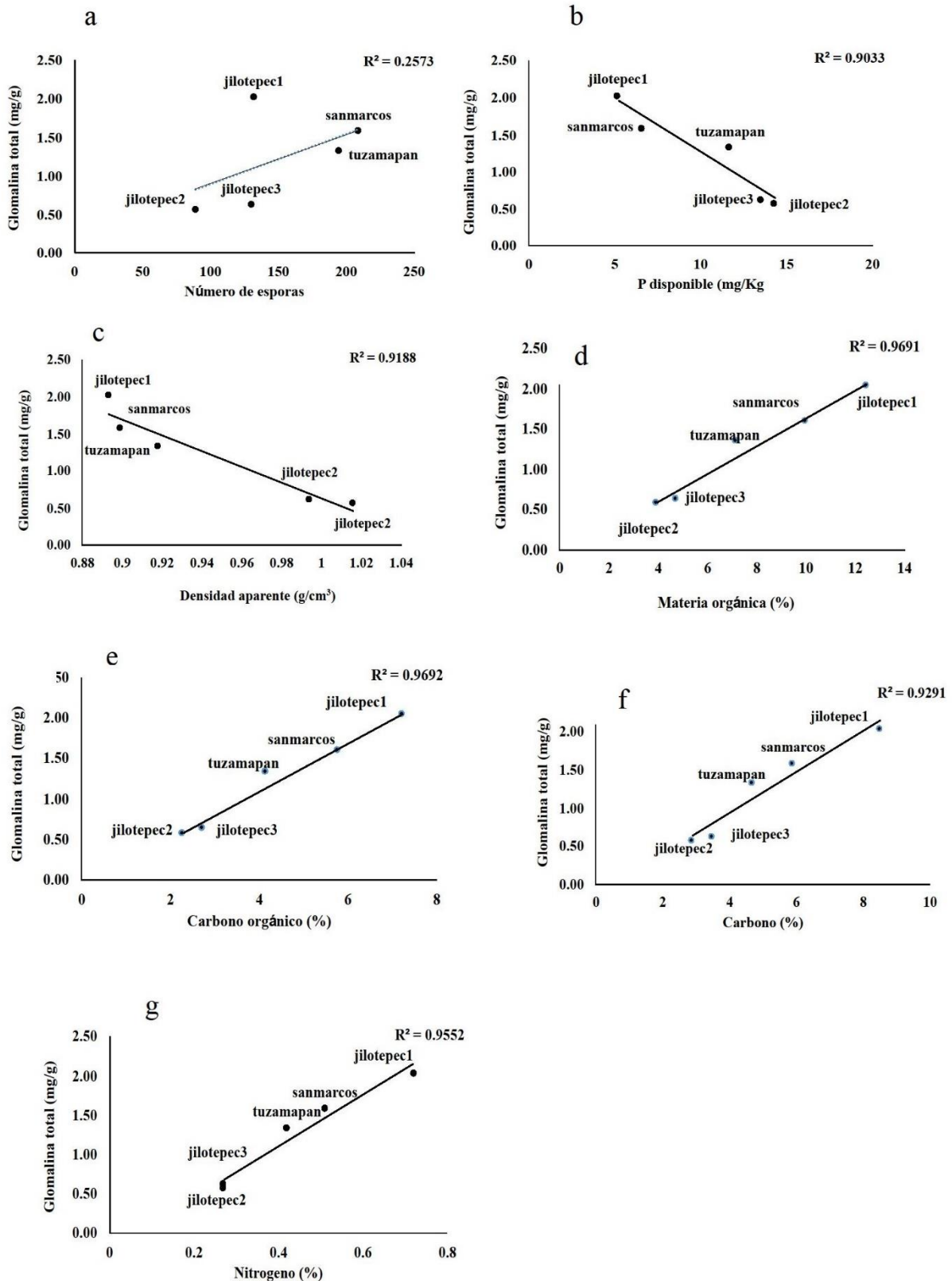
DISCUSIÓN

A la fecha no existen muchos estudios sobre la caracterización de la proteína glomalina en suelos de agroecosistemas cafetaleros; Cogo [30] en un cafetal en Brasil refiere valores de glomalina hasta de 2.6 mg/kg, los cuales son ligeramente mayores a los valores reportados en este trabajo (hasta 2.0 mg/kg). La fracción de glomalina total que se presentan para los cafetales en este estudio, son superiores a los expuestos en otras investigaciones en suelos

agrícolas en cultivos de trigo, maíz y girasol [31], dichos trabajos refieren valores de glomalina total de 0.32-0.71 mg/kg.

La mayoría de los estudios donde se evalúa la glomalina se han realizado en suelos de pastizales, en bosque templados y selva. Los valores de glomalina total para diversos pastizales templados en Estados Unidos varían de 0.62-2.5 mg/kg [32, 33, 34, 35, 36]. Existen estudios, donde se señalan valores de glomalina total de hasta 5.8 mg/kg para suelos de bosques templado [37, 38, 34, 36]. Valores aún mayores han sido obtenidos en suelos de selva hasta de 13.5 mg/kg [39, 40, 36]. Treseder y Turner [35] señalan que los niveles de glomalina total varían entre los diferentes biomas, lo cual puede ser atribuido a las condiciones del suelo (disponibilidad de nutrientes, agua, agregados y manejo del suelo) o bien a las diferencias ambientales que influyen directamente en la producción primaria neta y en la abundancia de los HMA en cada uno de los biomas. Rodríguez-Yon y col. [41] señalan que la glomalina es un indicador del grado de perturbación/degradación de los suelos ya que revelan diferencias marcadas en las fracciones de glomalina en suelos con diferentes cultivos, condicionada, además, por diversos factores como los cultivos presentes o el uso de la tierra y las prácticas agrícolas utilizadas o el manejo del suelo, entre otros. Los resultados expuestos en este trabajo, avalan que el agroecosistema cafetalero funciona como reservorio de la biodiversidad de los HMA, ya que el contenido de glomalina resultó alto comparado con otros suelos agrícolas. Asimismo, los suelos de estas

Figura 2. Regresiones lineales simples entre el contenido de glomalina total con las variables número de esporas de HMA y algunas características físicoquímicas del suelo de las fincas cafetaleras.



fincas cafetaleras al tener un manejo convencional y los arvenses son manejados mediante chapeo sin utilizar herbicidas existe una alta diversidad vegetal tanto de especies arbóreas como de pastos que producen abundantes raicillas que funcionan como hospederas de HMA y liberan contenidos de glomalina superiores a los suelos sin vegetación. Una mayor diversidad florística aunada a la alta biomasa de raíces favorece las reservas de fotosintatos que utilizan los HMA, lo cual está estrechamente relacionado con producción de glomalina [42].

Se ha reportado que los niveles de glomalina no siempre se relacionan con la abundancia y diversidad de los propágulos de HMA [40], ya que diferentes factores pueden influir en esto. Las diferentes formas de evaluar la presencia de HMA (esporas, longitud de raíces, colonización, micelio activo) tienen limitaciones y pueden asumir diferentes dinámicas que no siempre se relacionan con la glomalina del suelo [43]. Por otro lado, las diferentes especies de HMA pueden producir diferentes cantidades de glomalina, viéndose reflejado esto en los niveles de glomalina detectados en los suelos. Wright y Upadhyaya [44, 26] argumentan que *Gigaspora rosea* y *G. gigantea* producen una mayor cantidad de glomalina que *Glomus intrarradices* y *G. etunicatum*; asimismo Lovelock [40] menciona que *Acaulospora morrowiae* produce mayores niveles de glomalina que *Gigaspora rosea*, *Glomus etunicatum* y *G. intrarradices*. En síntesis, las especies de *Glomus* producen una mayor cantidad de glomalina que especies del

género *Gigaspora*. En este trabajo donde no se detectó una relación entre el número de propágulos de esporas y los niveles de glomalina, es posible que en estos suelos de cafetales la glomalina y la comunidad de HMA presentan dinámicas diferentes.

Se ha comprobado que la presencia de glomalina (GFE y GT) en el suelo puede tener efectos positivos físicos y bioquímicos en la dinámica edáfica. Por un lado, las fracciones de glomalina (GFE y GT) por sus características fisicoquímicas actúan como aglutinantes de las partículas minerales y orgánicas del suelo, lo que favorece la producción de microagregados en el suelo, reduciendo significativamente la propensión a la erosión hídrica o eólica [45, 46], además de generar microporos que son esenciales para la circulación del agua y el resguardo de la humedad en la matriz del suelo [47]. Por otro lado, la formación de estos microagregados resguarda en su interior la materia orgánica de la degradación bacteriana, liberándola más lentamente. Este proceso es favorable para el mantenimiento de la energía potencial resguardada entre las moléculas de las fracciones de glomalina [48]. Por lo tanto, la cuantificación de esta proteína en el suelo podría revelar historias del manejo reciente, en el caso de la GFE, mientras que la GT podría indicar la acumulación de C por más tiempo.

El efecto positivo de la relación mutualista entre raíces y HMA está ampliamente documentado, sin embargo, la adición de P a los cultivos de café para satisfacer los requerimientos nutrimentales e incrementar los rendimientos agrícolas, parece tener un efecto

adverso en las poblaciones de HMA toda vez que las plantas no requieren asociarse con estos hongos para obtener el P, este patrón se evidenció en este estudio. Además, la densidad aparente también estuvo relacionada negativamente, debido quizás a la mayor entrada de oxígeno y agua al interior del suelo, lo que favorece la multiplicación de organismos saprobios y de los que causan pudrición en las hifas de los HMA. Zhong [49] presenta resultados semejantes en suelos agrícolas en China.

En este trabajo se confirmó que la GT refleja el contenido total y acumulado de la glomalina altamente correlacionado con la materia orgánica del suelo (MO), pudiendo estar relacionado con procesos de secuestro de C a largo plazo [50], debido a que es una proteína altamente estable en condiciones edáficas, que puede permanecer entre 7-42 años en el suelo dando cuenta del manejo de periodos más remotos. Además, la alta concentración de MO derivado de la glomalina está relacionada con una mayor estabilidad y resiliencia (salud) del suelo [48]. La fracción más lábil (GFE) pudiera reflejar manejos más recientes ya que es la que deriva de procesos metabólicos inmediatos, por lo que se puede relacionar con aspectos de la calidad, es decir, con cultivos específicos, por ejemplo, cultivos de plantas coberteras o plantas fijadoras de nitrógeno. Diversos estudios concuerdan con los resultados que aquí se presentan, ya que también detectaron una estrecha relación de los niveles de glomalina con el contenido de carbono orgánico [51, 52, 33, 53, 35, 49, 54, 41]. Por otro lado, el

nitrógeno tiene una marcada influencia en el desarrollo de las plantas debido a que forma parte de la síntesis de la molécula de clorofila, ácidos nucleicos y las proteínas, y se ha observado que este nutriente tiene efectos benéficos en el desarrollo de los HMA, así que es de esperar mayores niveles de glomalina en suelos con alto contenido de nitrógeno. En este estudio, la glomalina total y el nitrógeno se relacionaron positivamente (95%). A pesar de que existen estudios donde se han reportado efectos contradictorios de la disponibilidad de nitrógeno con la glomalina [33], varios estudios concuerdan con los resultados de este trabajo [37, 49, 54].

Este trabajo representa el primer estudio sobre evaluación de fracciones de glomalina en cafetales en México, sin embargo, se sugiere incluir muestreos en otras estaciones del año, así como complementar metodologías moleculares con el fin de detectar estructuras fúngicas (hifas intrarradicales y micelio extramático) que no son perceptibles en los estudios morfológicos. Es importante destacar que la glomalina se puede utilizar para cuantificar la actividad de los HMA en los suelos de cafetales ya que puede funcionar como biomarcador para la rápida detección de los HMA.

CONCLUSIÓN

Este trabajo permitió caracterizar los niveles de dos fracciones de glomalina (total y fácilmente extraíble) en diferentes fincas cafetaleras del estado de Veracruz y que se relaciona tanto positiva como negativamente con algunas

variables fisicoquímicas de los suelos. Los resultados confirman que el agroecosistema cafetalero funge como reservorio de la biodiversidad de los HMA, ya que tanto el número de esporas como el contenido de glomalina resultó alto.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a COVEICYDET por el financiamiento del proyecto 13 1627: “Desarrollo de un bioinoculante fúngico solubilizador de fósforo del suelo y promotor del crecimiento y productividad de plantas de café (*Coffea arabica* var. Costa Rica) en Jilotepec, Veracruz” y al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por el financiamiento del proyecto 10698.21-PD “Caracterización y propagación de hongos micorrícicos arbusculares de suelos cafetaleros del centro del estado de Veracruz”. Los financiamientos otorgados sirvieron para la realización de este estudio.

A los propietarios de las fincas por permitir el acceso para tomar muestras de suelo y a los alumnos Yois Ariana Castro Rodríguez y Ángel Juárez García por el apoyo en el procesamiento de las muestras.

REFERENCIAS

[1]. SADER. Obtenido <https://www.gob.mx/agricultura>

[2]. Moguel P, Toledo VM. Biodiversity conservation and traditional coffee systems of Mexico. *Biol Conserv* 1999; 13:11-21.

[3]. Cerdán CR, Rebolledo MC, Soto G, Rapidel B, Sinclair FL. Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems. *Agric Syst* 2012; 110:119-130. doi:10.1016/j.agsy.2012.03.014

[4]. Chait G. Café en Colombia: servicios ecosistémicos, conservación de la biodiversidad. *Sistemas agroforestales, funciones productivas, socioeconómicas y ambientales*. Turrialba: CATIE 2015; 349-364.

[5]. Villarreyna R, Avelino J, Cerda R. Adaptación basada en ecosistemas: efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales. *Agron Mesoam* 2020; 31(2): 499-516. doi:10.15517/am.v31i2.37591

[6]. Manson RH, Hernández-Ortiz V, Gallina S, Mehlreter K. Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación. Instituto de Ecología, A.C. e Instituto de Nacional de Ecología (INESEMARNAT): México 2008.

[7]. Heredia A, Arias RM. Hongos saprobios y endomicorrizógenos en suelos. In: Manson RH, Hernández-Ortiz V, Gallina S, Mehlreter K, Eds. *Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación*; 2008; 193-212.

[8]. Arias RM, Heredia-Abarca G, Sosa VJ, Fuentes-Ramírez LE. Diversity and abundance of arbuscular mycorrhizal fungi spores under

different coffee production systems and in a tropical montane cloud forest patch in Veracruz, Mexico. *Agrofor Syst* 2012; 85(1):179-193. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9414-3>

[9]. Camargo-Ricalde SL, Montaña NM, De la Rosa-Mera CJ, Montaña ASA Micorrizas: una gran unión debajo del suelo 2012; *Revista Digital Universitaria* 13(7). <http://www.revista.unam.mx/vol.13/num7/art72/index.html>

[10]. Saha R, Mondal B, Naskar B. AMF inoculation changes, the root development pattern of plants at early stage of colonization. *Int J Bio-resource Environ Agric Sci* 2014; 1:43-47.

[11]. Zou YN, Srivastava AK, Wu QS. Glomalin: A potential soil conditioner for perennial fruits. *Int J Agric Biol* 2016; 18: 293-297.

[12]. Martinez LB, Pugnaire FI. Interacciones entre las comunidades de hongos formadores de micorrizas arbusculares y de plantas. Algunos ejemplos en los ecosistemas semiáridos. *Ecosistemas* 2009; 18(2): 44-54.

[13]. Yao Q, Zhu HH. Arbuscular mycorrhizal fungi: A belowground regulator of plant diversity in grasslands and the hidden mechanisms. In: Runas J, Dahlgren T, Eds. *Grassland Biodiversity-Habitat Types, Ecological Processes and Environmental Impacts* New York: Nova Science Publisher; 2010;1-14.

[14]. Smith S, Read DA. *Mycorrhizal symbiosis*, Academic Press 2010.

[15]. Fisher JB, Jayachandran DK. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance seedling growth in two endangered plant species from South Florida. *Int J Plant Sci* 2002; 163:559-566. <https://doi.org/10.1086/340428>.

[16]. Six J, Bossuyt H, Degryze S, Deneuf K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res* 2004; 79:7-31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>.

[17]. Gao W, Wang P, Wu Q-S. Functions and application of glomalin-related soil proteins: a review. *Sains Malays* 2019; 48(1): 111-9. DOI:10.17576/jsm-2019-4801-13

[18]. Lozano Sánchez JD, Armbrecht I, Montoya Lerma J. Hongos formadores de micorrizas arbusculares y su efecto sobre la estructura de los suelos en fincas con manejos agroecológicos e intensivos. *Acta Agron* 2015; 64(4): 289-296.

[19]. Wright S, Upadhyaya A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Sci* 1996; 161: 575-586.

[20]. Ryan MG, Graham JH. Is there a role for arbuscular mycorrhizal fungi in production agriculture?. *Plant Soil* 2002; 244: 263-271. <https://doi.org/10.1023/A:1020207631893>.

[21]. Morell F, Hernández A, Borges Y, Marentes FL. La actividad de los hongos micorrízicos arbusculares en la estructura del suelo. *Cult Trop* 2009; 30(4):00-00.

[22]. Rillig MC, Wright SF, Nichols KA, Schmidt WF, Torn MS. Large contribution of

arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. *Plant Soil* 2001; 233:167-177.

<https://doi.org/10.1023/A:1010364221169>.

[23]. Rillig MC, Maestre FT, Lamit LJ. Microsite differences in fungal hyphal length, glomalin, and soil aggregate stability in semiarid Mediterranean steppes. *Soil Biol Biochem* 2003; 35:1257-1260. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00185-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00185-8)

[24]. Cornejo P, Meier S, Borie G, Rillig MC, Borie F. Glomalin-related soil protein in a Mediterranean ecosystem affected by a copper smelter and its contribution to Cu and Zn sequestration. *Sci Total Environ* 2008; 15: 406(1-2): 154-60. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.07.045.

[25]. Gerdemann JW, Nicolson TH. Spore of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Trans Br Mycol Soc* 1963; 46: 234-44.

[26]. Wrigth SF, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 1998; 198(1): 97-107.

[27]. Bradford MM. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem* 1976; 72(1-2): 248-54.

[28]. StatSoft, Inc. *Statistica para Windows v. 10.0*. Data analysis software system. Tulsa. [cd-Rom] 2017.

[29]. NORMA Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al monóxido de carbono (CO). Valores normados para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.

[30]. Cogo FD, Saggini Júnior OJ, Guimarães PTG, Siqueira JO, Carneiro MAC. High rates of agricultural gypsum affect the arbuscular mycorrhiza fungal community and coffee yield. *Bragantia* 2020; 79: 612-622.

[31]. Rillig MC, Wright SF, Shaw MR, Field CB. Artificial climate warming positively affects arbuscular mycorrhizae but decreases soil aggregate water stability in an annual grassland. *Oikos* 2002; 97: 52-58. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2002.970105.x>.

[32]. Lutgen ER, Muir-Clairmont D, Graham J, Rillig MC. Seasonality of arbuscular mycorrhizal hyphae and glomalin in a western Montana grassland. *Plant and Soil* 2003; 257(1): 71-83. <https://doi.org/10.1023/A:1026224209597>.

[33]. Nichols KA, Wright SF. Comparison of glomalin and humic acid in eight native US soils. *Soil Sci* 2005; 170: 985-997. doi: 10.1097/01.ss.0000198618.06975.3c.

[34]. Batten KM, Six J, Scow KM, Rillig MC. Plant invasion of native grassland on serpentine soils has no major effects upon selected physical and biological properties. *Soil Biol Biochem* 2005; 37(12): 2277-2282. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.04.005>

- [35]. Treseder KK, Turner KM. Glomalin in ecosystems. *Soil Sci Soc Am J* 2007; 71: 1257-1266. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0377>.
- [36]. Wright SF, Anderson RL. Aggregate stability and glomalin in alternative crop rotations for the central Great Plains. *Soil Biol Biochem* 2000; 31: 249-253. <https://doi.org/10.1007/s003740050653>
- [37]. Knorr MA, Boerner REJ, Rillig MC. Glomalin content of forest soils in relation to fire frequency and landscape position. *Mycorrhiza* 2003; 13: 205-210. <https://doi.org/10.1007/s00572-002-0218-1>.
- [38]. Steinberg PD, Rillig MC. Differential decomposition of arbuscular mycorrhizal fungal hyphae and glomalin. *Soil Biol Biochem* 2003; 35: 191-194. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00249-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00249-3)
- [39]. Rillig MC, Wright SF, Kimball BA, Pinter PJ, Wall GW, Ottman MJ, Leavitt SW. Elevated carbon dioxide and irrigation effects on water stable aggregates in a sorghum field: A possible role for arbuscular mycorrhizal fungi. *Glob Change Biol* 2001; 7: 333-337. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2001.00404.x>.
- [40]. Lovelock CE, Wright SF, Nichols KA. Using glomalin as an indicator for arbuscular mycorrhizal hyphal growth: An example from a tropical rain forest soil. *Soil Biol Biochem* 2004; 36: 1009-1012. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.02.010>.
- [41]. Rodríguez-Yon Y, Chiriboga-Morocho R, Concha-Egas TG, de León-Lima DP. Caracterización de las fracciones de glomalina en suelos Ferralíticos Rojos con diferente uso. *Cultivos Tropicales* 2020; 41(4):e04
- [42]. González-Chávez MC, Gutiérrez MC, Wright S. (2004). Hongos micorrízico arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad, *Terra Latinoam* 2004; 22: 507-214.
- [43]. Purin S, Rillig MC. The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin: Limitations, progress, and a new hypothesis for its function. *Pedobiologia* 2007; 51(2): 123-130. doi:10.1016/j.pedobi.2007.03.002
- [44]. Wright SF, Upadhyaya A. Quantification of arbuscular mycorrhizal fungi activity by the glomalin concentration on hyphal traps. *Mycorrhiza* 1999; 8(5): 283-285.
- [45]. Prasad M, Chaudhary M, Ramakrishnan S, Mahawer SK. Glomalin: a miracle protein for soil sustainability. *Indian Farmer* 2018; 5(9): 1092-100.
- [46]. Gomathy M, Sabarinathan KG, Sivasankari-Devi T, Pandiyarajan P. Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-super glue. *Int J Curr Microbiol Appl Sci* 2018; 7(7): 2853-7. DOI:10.20546/ijcmas.2018.707.334
- [47]. De la Cruz-Elizondo, Y, Fontalvo-Buelvas JC. *Biología del suelo. CÓDICE/ Taller Editorial/Suma Textual: México* 2019.
- [48]. Gallardo LJF. *La materia orgánica del suelo. Residuos orgánicos, humus, compostaje y captura de carbono. Sociedad Iberiamericana de Física y Química Ambiental. Jáser Proyectos Editoriales/Nueva Graficesa: España* 2016.

[49]. Zhong Z, Wang W, Wang Q, Wu Y, Wang H, Pei Z. Glomalin amount and compositional variation, and their associations with soil properties in farmland, northeastern China. *J Plant Nutr Soil Sci* 2017; 180:563-575. DOI: 10.1002/jpln.201600579.

[50]. Báez-Pérez A, González-Chávez MC, Etchevers-Barra JD, Prat C, Hidalgo-Moreno C. Glomalin and carbon sequestration in cultivated tepetates. *Agrociencia* 2010; 44(5): 517–29.

[51]. Bird SB, Herrick JE, Wander MM, Wright SF. Spatial heterogeneity of aggregate stability and soil carbon in semi–arid rangeland. *Environ Poll* 2002; 116: 445–455. DOI: 10.1016/s0269-7491(01)00222-6

[52]. Rillig MC, Ramsey PW, Morris S, Paul EA. Glomalin, an arbuscular–mycorrhizal fungal soil protein, responds to land–use change. *Plant Soil* 2003; 253:293-299. <https://doi.org/10.1023/A:1024807820579>.

[53]. Morales A, Castillo CG, Rubio R, Godoy R, Rouanet JL, Borie F. Niveles de glomalina en suelos de dos ecosistemas del sur de Chile. *RC Suelo Nutr Veg* 2005; 5(1): 37-45. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002008000100002>

[54]. Holtz EWF, Giuffré L, Ciarlo E, Cortinez AG. Glomalin and Its relationship with inoculation, fertilization and soils with different sand proportion. *J Agric Ext Rural Dev* 2018; 11(2): 24-32. DOI:10.9790/2380-1102022432