

Artículo original

Caracterización de las fracciones de glomalina en suelos Ferralíticos Rojos con diferente uso

Yakelin Rodríguez-Yon^{1*} 

Romel Chiriboga-Morocho² 

Telmo Gilberto Concha-Egas³ 

Daniel Ponce de León-Lima⁴ 

¹Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), carretera San José-Tapaste, km 3½, Gaveta Postal 1, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. CP 32 700

²Corporación de Estudios, Servicios, Investigación e Inversiones para el Sector Agroambiental (CESIIA), Ecuador

³Hacienda "Hermanos Concha Egas", Ecuador

⁴Consultora Agroprecisión Cía Ltda, Ecuador

*Autor para correspondencia: yakelin@inca.edu.cu

RESUMEN

Los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) establecen simbiosis con la mayoría de las plantas. Los mismos producen y liberan al suelo una glicoproteína denominada glomalina favoreciendo la formación de agregados estables en agua y mejoran la estructura de los suelos. El objetivo del presente trabajo fue caracterizar varios suelos Ferralíticos Rojos de la Llanura Roja de La Habana, con diferente uso, mediante algunas propiedades químicas (materia orgánica, pH, P, Ca, C, N) y biológicas, así como establecer correlaciones entre ambos tipos de variables. Las variables biológicas fueron el número de esporas de HMA y los contenidos de proteínas del suelo relacionadas a glomalina (total y fácilmente extraíble). Para esto se utilizaron diferentes métodos extractivos, seguido de la estimación de la concentración de proteínas o del conteo de esporas totales. Los resultados revelaron diferencias en las variables determinadas relacionadas a los cultivos presentes y al manejo del suelo. En general, los bosques mostraron valores superiores en las fracciones de glomalina, seguidos por los cultivos de caña (*Saccharum officinarum*) y pasto, mientras que los valores inferiores correspondieron a los suelos cultivados con papa (*Solanum tuberosum*), constituyendo

estas variables mejores indicadores de la calidad del suelo que el número de esporas de HMA, dada su correlación con algunas variables químicas del suelo como la materia orgánica, C, N, pH y Ca. Se sugieren investigaciones futuras para dilucidar los resultados obtenidos, principalmente en cuanto al uso de la glomalina como indicador biológico de la degradación/ rehabilitación de los suelos según el ecosistema en estudio.

Palabras clave: manejo agrícola, mejora de suelo, micorrizas arbusculares

Recibido: 14/10/2019

Aceptado: 08/09/2020

INTRODUCCIÓN

Los HMA son biotrofos obligados que se agrupan en la clase *Glomeromycotina* del phylum *Mucoromycota* ^(1,2), los que son ampliamente conocidos por su importancia en la nutrición de las plantas ⁽³⁾ y en la formación y estabilidad de agregados del suelo ^(4,5). Estos hongos también son importantes reguladores del flujo de carbono (C) desde las plantas hacia el suelo ⁽⁶⁾, pues consumen entre 4 y 20 % del C proveniente de la fotosíntesis vegetal, en dependencia de la especie fúngica involucrada, y contribuyen de manera notable a la biomasa microbiana del suelo en la mayoría de los ecosistemas ^(7,8). La glomalina es una glicoproteína recalcitrante producida por los HMA, con elevada estabilidad, vida media entre seis y 42 años, lenta velocidad de degradación que depende del suelo de origen y se ha señalado que constituye el mayor componente de la materia orgánica del suelo. Esta proteína puede influir en la fertilidad del suelo al acomplejarse con el hierro (Fe), así como en la remediación de suelos contaminados mediante su acomplejamiento con elementos potencialmente tóxicos ^(4,5,9,10).

Diversos trabajos demuestran que la concentración de glomalina está altamente correlacionada con el porcentaje de agregados estables en agua en un amplio rango de suelos, sean estos ácidos o calcáreos y bajo diversos cultivos tales como pastos, cereales, especies forestales, entre otros ^(4,5,8). Por lo que se considera que los HMA mejoran de forma notable la estabilidad de la estructura y calidad de los suelos y, por ende, contribuyen a la sostenibilidad de los agroecosistemas, a la vez que reducen la erosión de los suelos y las pérdidas de agua ^(11,12).

Se plantean dos posibles vías para la deposición de glomalina en el suelo, las que tienen implicaciones muy diferentes para su funcionalidad: la primera que se consideró es la secreción a partir del micelio de los HMA en su entorno inmediato (micorrizosfera), pero la principal parece ser la liberación producida por la descomposición de hifas o esporas al encontrarse formando parte estructural de las paredes de éstas ^(12,13).

De otro lado, los estudios que involucran a los HMA tienen el inconveniente del rango relativamente limitado de variables de respuesta adecuadas para medir su abundancia y actividad, entre las que se encuentran la identificación y conteo de esporas y la colonización radical, las cuales tienen limitaciones prácticas pues suponen un trabajo de laboratorio engorroso y largos años de experiencia visual. Por lo que se ha incluido la determinación de glomalina en este tipo de estudios debido a que la cuantificación de proteína es una técnica rápida, objetiva, barata y relativamente fácil de realizar ⁽¹⁴⁾.

Operacionalmente la glomalina se cuantifica como proteína del suelo relacionada a glomalina (GRSP, siglas en inglés) y se pueden evaluar dos fracciones de la misma: la glomalina total (GT) y la glomalina fácilmente extraíble (GFE). La primera representa la máxima cantidad que puede ser extraída y está fuertemente unida a las partículas de suelo, requiriendo por ello más tiempo (ciclos múltiples) de exposición a altas temperaturas para su extracción. Mientras que la GFE es el pool de más reciente deposición e incluso se ha sugerido que proviene de una descomposición parcial de la glomalina más estable (GT) ⁽⁴⁾. En adición, algunos autores han encontrado que condiciones de estrés hídrico en el suelo favorecen la deposición de glomalina ⁽¹¹⁾.

Por otra parte, los suelos Ferralíticos Rojos de Cuba se consideraban los de mayor fertilidad con valores de materia orgánica promedio de 5-7 %, según datos reportados por Bennet y Allison a principios del siglo XX. Ello indica que, en la segunda mitad del siglo XX, estos suelos sufrieron una aceleración en los procesos de degradación, relacionado con el mal manejo. En la actualidad es baja la productividad de estos suelos y la degradación de la estructura es alta, siendo una de las causas la pérdida de la materia orgánica. Además, existen evidencias de que los exudados y la biomasa de las raíces y los microorganismos, pueden formar una capa alrededor de las partículas que modifican sus propiedades aumentando su carácter hidrófobo. De ahí que se ha establecido una relación entre estos procesos y la actividad biológica de los suelos, donde los HMA pudieran jugar un rol fundamental.

El presente estudio se realizó como parte de las actividades enmarcadas en un proyecto encaminado a contribuir al esclarecimiento de los procesos de degradación de los suelos Ferralíticos Rojos de la Llanura Roja de La Habana, mediante la comparación de suelos con características de explotación diferentes. Para posteriormente y a partir de los resultados proponer medidas oportunas para frenar su deterioro y ayudar a su rehabilitación. En lo cual pudiera ser de interés la definición de variables biológicas indicadoras de la calidad de los suelos.

Por lo que el objetivo del trabajo fue caracterizar varios suelos Ferralíticos Rojos de la Llanura Roja de La Habana, con diferente uso, mediante algunas propiedades químicas y biológicas de los mismos, estas últimas variables relacionadas con la presencia y el funcionamiento de los HMA; además, de establecer correlaciones entre las variables estudiadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar el estudio se seleccionaron once suelos Ferralíticos Rojos ⁽¹⁵⁾, que se corresponden con Nitisol Ferrálico ⁽¹⁶⁾, con diferente uso (bosque o vegetación forestal y cultivados con caña (*S. officinarum* L.), pasto y papa (*S. tuberosum* L.), provenientes de distintos Municipios y localidades (Aguacate, San José de las Lajas, Managua, Güira de Melena, San Nicolás de Bari, Güines y Batabanó), pertenecientes a las Provincias Habana, Mayabeque y Artemisa, Cuba (Tabla 1).

Tabla 1. Información correspondiente a los distintos suelos Ferralíticos Rojos utilizados en el estudio

Área	Uso	Localidad	Coordenadas (Norte/Oeste)	Abreviatura
1	Bosque o vegetación forestal	Aguacate	414514,09/ 414514,09	Bos_A
2	Bosque o vegetación forestal	San José de las Lajas (Nazareno)	373436,46/ 349211,14	Bos_N
3	Bosque o vegetación forestal	Managua	369759,67/ 346762,83	Bos_M
4	Caña de azúcar	Aguacate	413135,72/ 350216,08	C_A
5	Caña de azúcar	San Nicolás de Bari	405687,85/ 327668,51	C_SN
6	Caña de azúcar	Güira de Melena	351429,44/ 335236,60	C_GM
7	Pastos	San José de las Lajas (Guayabal)	380688,14/ 352725,93	P_SJ
8	Pastos	San José de las Lajas (ICA)	393737,58/ 341265,54	P_ICA
9	Papa	Güira de Melena	347033,77/ 326533,58	Pa_GM
10	Papa	Güines	392994,03/ 329935,10	Pa_Gui
11	Papa	Batabanó	371394,72/ 328216,67	Pa_B

Se evaluaron algunas propiedades químicas de los suelos en el horizonte A, a una profundidad de 0 a 20 cm, para lo cual se realizó un muestreo aleatorio en las localidades seleccionadas para un total de 30 muestras por sitio. Las propiedades químicas evaluadas y las metodologías utilizadas fueron las siguientes: materia orgánica del suelo (MOS, %) Walkley y Black, pH (H₂O) potenciometría, fósforo asimilable (P₂O₅, mg kg⁻¹) Oniani, calcio intercambiable (Ca²⁺, cmol_c kg⁻¹) Maslova, capacidad de cambio de bases

($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) acetato de amonio 1N (pH 7,0), los porcentajes de carbono (C) y nitrógeno (N) se calcularon a partir de la MOS y se calculó la relación C/N.

Se tomaron muestras de suelo a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm) en esquema anidado para un total de 10 muestras por localidad para el estudio de las variables biológicas: número de esporas de HMA, proteínas del suelo relacionadas a glomalina total (GT) y proteínas del suelo relacionadas a glomalina fácilmente extraíble (GFE). La profundidad para la toma de estas muestras se estableció dado que los hongos estudiados se encuentran fundamentalmente en los primeros 20 cm del suelo. Ambas fracciones de glomalina se extrajeron según protocolos descritos previamente ⁽⁴⁾ y se cuantificaron en los extractos al evaluar la concentración de proteínas por el método de Bradford ⁽¹⁷⁾, donde la lectura de absorbancia se realizó a 595 nm en un espectrofotómetro (Genesys 10 UV Thermo Fisher). Para esto se preparó una curva patrón de albúmina de suero bovino a partir de una solución de 1 g L^{-1} , utilizando 6 concentraciones de esta solución entre 0,05-0,5 g L^{-1} . Las concentraciones de glomalina se expresaron en mg g^{-1} de suelo.

Para extraer las esporas de los suelos se procedió según una modificación realizada ⁽¹⁸⁾ del protocolo de tamizado húmedo y decantación ⁽¹⁹⁾. Una vez separadas las esporas, se lavaron con agua destilada y se vertieron en placa de conteo de nematodos para su cuantificación con auxilio del microscopio estéreo (Stemi 2000-C/50X).

Con los datos obtenidos de las variables biológicas evaluadas se calcularon los intervalos de confianza para cada suelo analizado, con una confianza del 95 %, para realizar la comparación y establecer las diferencias estadísticas. Además, se realizaron correlaciones de Pearson con una significación (α) de 0,05, entre las variables químicas del suelo y las biológicas determinadas. Para esto, en el caso de las variables biológicas se tomó un único valor medio (profundidad 0-20 cm) calculado a partir de las evaluaciones realizadas a las 2 profundidades. Asimismo, se realizaron correlaciones entre las variables biológicas evaluadas a las 2 profundidades y los valores medios totales calculados para la profundidad 0-20 cm. Estos análisis se realizaron utilizando el paquete estadístico IBM SPSS Statistics, Versión 22 para Windows.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se muestran los resultados de las propiedades químicas de los suelos estudiados. Los porcentajes superiores de materia orgánica del suelo (MOS) se encontraron en dos áreas de bosque (~5), seguido por las dos de pasto (~4), y los valores inferiores se observaron en dos de las áreas cultivadas con caña (2,6 y 2,9), así como en

dos áreas destinadas al cultivo de papa (~3). El C y el N manifestaron una tendencia similar a la MOS. El pH osciló entre 5,6 y 8,1, correspondiendo a un área de bosque y una de papa, respectivamente. También mostraron pH ácido un área de pasto y una de caña. Otra zona de bosque presentó pH básico, mientras que el resto manifestó valores alrededor de la neutralidad.

El fósforo mostró diferencias asociadas al uso de la tierra (Tabla 2), con valores más bajos en las áreas cañeras (<90 mg kg⁻¹), seguido por las de pasto (~105) y luego las cultivadas con papa (~250). Mientras que las 3 zonas de bosque presentaron tenores elevados con diferencias entre ellas, siendo la de pH ácido y MOS elevada (Managua) la de menor contenido de este elemento (125 mg kg⁻¹). El contenido de P superior se encontró en Nazareno (384 mg kg⁻¹), donde la MOS también fue alta y el pH cercano a la neutralidad^(4,7). Por su parte, el bosque de Aguacate presentó valores similares de P y MOS al de las áreas paperas, y el pH fue básico semejante al área de papa de Batabanó. El contenido de Ca manifestó una tendencia en correspondencia con el uso de la tierra y el pH (Tabla 2). Así, en los dos bosques con pH superior a 7, también los valores de este catión fueron los más elevados (20-30 cmol_c kg⁻¹), mientras que el bosque con pH ácido mostró un valor bajo en comparación con el resto de los suelos analizados. En las áreas cañeras el Ca osciló entre 9 y 15 cmol_c kg⁻¹, correspondiendo el valor inferior al suelo ácido y el superior al de pH 7,1. Por su parte, los pastos presentaron valores medios y también estuvieron de acuerdo a los pHs, siendo el más bajo en el suelo ácido. Las áreas cultivadas con papa mostraron valores elevados (14-16 cmol_c kg⁻¹), solo por debajo de los dos bosques, y cuyos pHs fueron de neutro a básico. La capacidad de cambio de bases mostró un comportamiento similar al del contenido de Ca y fundamentalmente al pH de los suelos. Además, la relación C/N manifestó valores semejantes entre 11,2 y 11,71 (Tabla 2).

Es de destacar que los bajos valores de MOS y de P que presentaron las áreas dedicadas al cultivo de la caña de azúcar es consecuencia de los numerosos años de explotación que han sufrido estas tierras, que comúnmente datan de mediados del siglo XVIII para este cultivo en nuestro país. En cambio, los valores elevados de P, Ca y CCB en las áreas de papa, incluso de pH en uno de ellos, se deben a la fertilización química que tiene lugar en este cultivo el cual es considerado de altos insumos, lo que contrasta con el bajo porcentaje de MOS que presentaron estos suelos debido al cultivo intensivo de los mismos y al manejo, conduciendo a su degradación.

Tabla 2. Resultados de las propiedades químicas de los suelos Ferralíticos Rojos estudiados de acuerdo a su uso y localidad

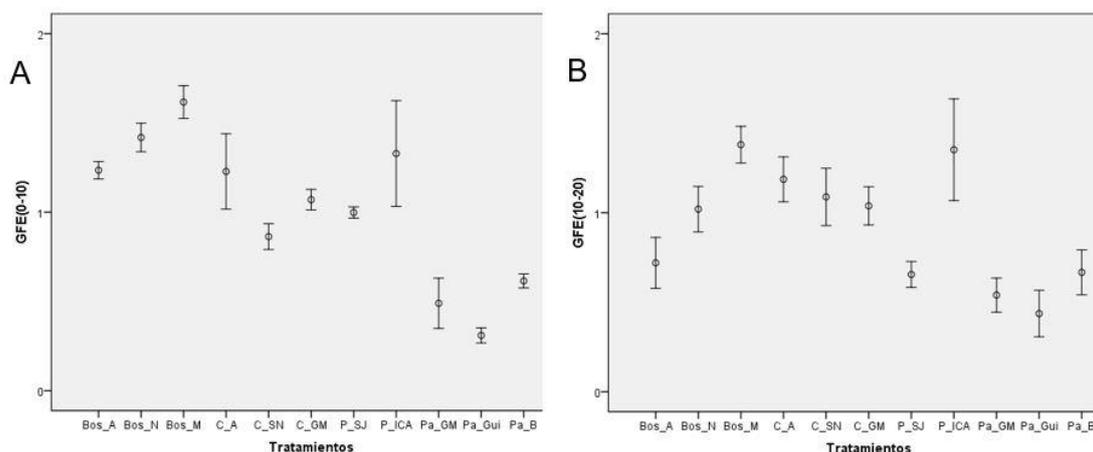
Uso/localidad	MOS	pH (H ₂ O)	P ₂ O ₅	Ca ²⁺	CCB	C	N	C/N
	(%)		(mg kg ⁻¹)	cmol _c kg ⁻¹				
Bosque_Aguacate	3,30	7,7	261,0	30,20	38,22	1,91	0,17	11,24
Bosque_Nazareno	5,40	7,4	384,0	20,00	25,19	3,13	0,27	11,59
Bosque_Managua	5,00	5,6	125,0	11,20	12,61	2,9	0,25	11,60
Caña_Aguacate	3,80	6,0	18,0	9,50	15,86	2,20	0,19	11,58
Caña_San Nicolás	2,60	7,1	36,0	15,00	22,84	1,51	0,13	11,62
Caña_Güira de Melena	2,93	6,8	87,5	10,10	12,72	1,70	0,15	11,33
Pastos_Guayabal	4,00	6,9	104,0	13,70	17,58	2,32	0,2	11,60
Pastos_ICA	4,30	5,7	107,0	12,50	15,10	2,49	0,22	11,32
Papa_Güira de Melena	3,43	7,3	245,5	14,95	17,69	1,83	0,16	11,44
Papa_Güines	3,15	6,9	267,0	14,35	16,92	1,99	0,17	11,71
Papa_Batabanó	3,00	8,1	265,5	15,70	27,23	1,74	0,15	11,60

MOS- materia orgánica del suelo, P- fósforo asimilable, Ca²⁺- calcio intercambiable, CCB-capacidad de cambio de bases,

C- carbono, N- nitrógeno, C/N- relación C/N

Los resultados del contenido de GFE se observan en la Figura 1. En general se detectó un comportamiento relacionado al uso de la tierra a la profundidad de 0-10 cm (Figura 1A), donde los bosques presentaron valores altos con diferencias significativas entre sí, destacándose el de Managua (Bos_M). Le siguieron las áreas cultivadas con pasto y caña de azúcar con valores intermedios, aunque el pasto del ICA no mostró diferencias con los tres bosques, ni la caña de Aguacate con los dos bosques de valores bajos. Los valores inferiores de esta variable correspondieron al cultivo de la papa con diferencias entre algunas áreas. A la profundidad de 10-20 cm (Figura 1B), también las zonas cultivadas con papa manifestaron los valores inferiores, al igual que un área de pasto (P_SJ) y el bosque de Aguacate (Bos_A). El resto de los suelos estudiados mostraron valores superiores y similares, a excepción de los dos bosques que reflejaron diferencias significativas entre sí.

Al realizar la comparación entre las dos profundidades evaluadas no se observaron diferencias significativas en esta variable en la mayoría de los suelos (Figura 1). No obstante, los tres bosques y un área de pasto (Guayabal) presentaron valores superiores a la profundidad menor (0-10 cm). Cabe resaltar que esta variable evaluada a ambas profundidades manifestó una correlación positiva y altamente significativa ($p=0,002$; $\alpha=0,05$). Además, la GFE (0-20 cm) mostró correlación positiva con la MOS ($p=0,044$; $\alpha=0,05$), el C ($p=0,05$; $\alpha=0,05$) y el N ($p=0,042$; $\alpha=0,05$) y negativa con el pH ($p=0,036$; $\alpha=0,05$).



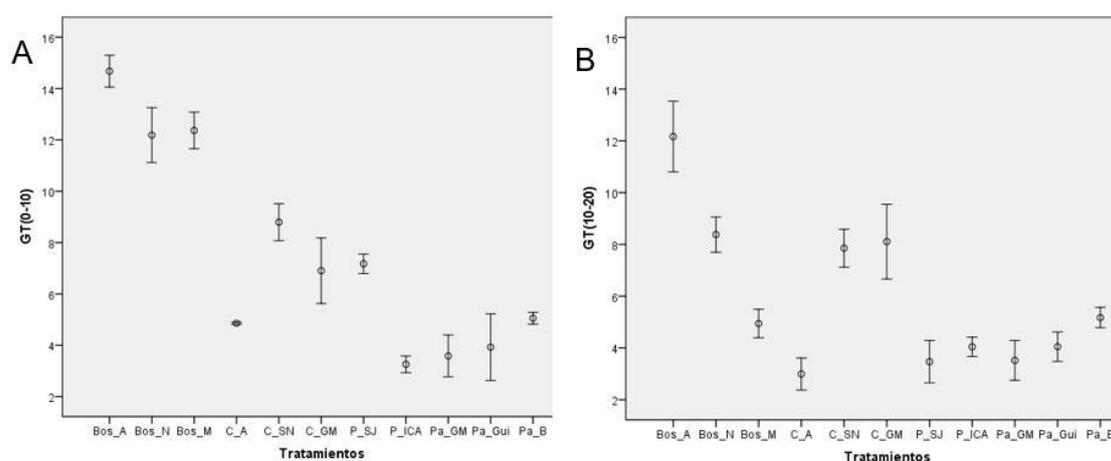
Bos_A- bosque Aguacate, Bos_N- bosque Nazareno, Bos_M- bosque Managua, C_A- caña Aguacate, C_SN- caña San Nicolás de Bari, C_GM- caña Güira de Melena, P_SJ- pasto Guayabal, P_ICA- pasto ICA, Pa_GM- papa Güira de Melena, Pa_Gui- papa Guines, Pa_B- papa Batabanó

Figura 1. Resultados del contenido de proteínas del suelo relacionadas a glomalina fácilmente extraíble (GFE) a las profundidades 0-10 (A) y 10-20 (B) cm, expresado en mg g⁻¹ de suelo, en suelos Ferralíticos Rojos con diferente uso de las distintas localidades. Se muestran los intervalos de confianza (95 %)

Los contenidos de GT (Figura 2) fueron superiores a los de la GFE (Figura 1), como era de esperarse dado lo que representa cada una de estas fracciones en el suelo y los métodos extractivos utilizados debido a su estabilidad y labilidad, tasas de degradación y tiempo de vida media ^(4,8,20,21). De forma similar al comportamiento de la GFE, en el contenido de GT entre las profundidades estudiadas (Figura 2) no se detectaron diferencias en las áreas cultivadas con papa, en el pasto del ICA y en dos zonas cañeras (C_SN y C_GM). Además, el resto de los suelos mostraron valores superiores a la menor profundidad. Otro aspecto común entre las dos fracciones de glomalina analizadas fue que se evidenciaron mejor las diferencias significativas a la profundidad de 0-10 cm de acuerdo al uso de la tierra (Figuras 1 y 2). En este sentido, se encontró correlación positiva entre la GT y la GFE evaluadas a esta profundidad ($p=0,049$; $\alpha=0,05$), lo cual no se observó a la profundidad de 10-20 cm.

Los resultados del contenido de GT se observan en la Figura 2, donde a la profundidad 0-10 cm se detectó un comportamiento relacionado al uso de la tierra (Figura 2A). Los valores superiores correspondieron a los tres bosques, destacándose el de Aguacate (Bos_A). A continuación, con valores intermedios, se encontraron las áreas cañeras y el pasto del Guayabal (P_SJ); aunque la caña cultivada en Aguacate (C_A) no difirió de dos de las áreas cultivadas con papa. Siendo precisamente los suelos de papa y el pastizal del ICA los que mostraron los valores inferiores. Mientras que a la profundidad 10-20 cm

(Figura 2B), el valor superior se observó en el bosque de Aguacate, seguido por el bosque de Nazareno (Bos_N) y dos áreas de caña. El bosque de Managua (Bos_M) y el área de papa de Batabanó (Pa_B) se ubicaron a continuación con valores bajos. Los valores inferiores correspondieron a las otras dos áreas cultivadas de papa, los dos pastizales y el área cañera de Aguacate (C_A). Es de destacar que esta variable evaluada a ambas profundidades manifestó una correlación positiva y altamente significativa ($p=0,006$; $\alpha=0,05$). Además, la GT (0-20 cm) mostró correlación positiva con el Ca ($p=0,012$; $\alpha=0,05$) y la CCB ($p=0,032$; $\alpha=0,05$).



Bos_A- bosque Aguacate, Bos_N- bosque Nazareno, Bos_M- bosque Managua, C_A- caña Aguacate,
C_SN- caña San Nicolás de Bari, C_GM- caña Güira de Melena, P_SJ- pasto Guayabal, P_ICA- pasto ICA,
Pa_GM- papa Güira de Melena, Pa_Gui- papa Guines, Pa_B- papa Batabanó

Figura 2. Resultados del contenido de proteínas del suelo relacionadas a glomalina total (GT) a las profundidades 0-10 (A) y 10-20 (B) cm, expresado en mg g⁻¹ de suelo, en suelos Ferralíticos Rojos con diferente uso de las distintas localidades.

Se muestran los intervalos de confianza (95 %)

Las diferencias encontradas en ambas fracciones de glomalina, entre las profundidades, y en los distintos suelos estudiados pueden atribuirse a los diferentes usos y explotación de la tierra según la localidad; teniendo un peso fundamental los tipos de cultivo y el tiempo de establecidos, así como los cultivares/variedades de estas especies, dada las características en sus sistemas radiculares, y las prácticas de manejo agrícola aplicadas en cada caso. En resumen, el grado de perturbación del ecosistema tiene una estrecha relación con la respuesta de estas variables biológicas. Asimismo, hay que tener en cuenta las diversas especies vegetales arbóreas presentes en los bosques y el tiempo de establecidas, y que mayormente se asocian a hongos ectomicorrízicos⁽¹⁸⁾, aunque en algunos casos también se observaron especies herbáceas.

En concordancia con este estudio, los resultados encontrados en tres suelos Ferralíticos Rojos Lixiviados con diferente manejo mostraron diferencias en estas tres variables, siendo inferiores los valores donde la acción antrópica era más intensa como el suelo bajo cultivo intensivo y, por tanto, los autores concluyeron que las pérdidas en la estructura de estos suelos eran mayores según indicadores físico-químicos y biológicos determinados, hasta un punto que conlleva a la degradación de los mismos, así como la pérdida en sus contenidos de materia orgánica, nutrientes para las plantas y población microbiana en general ⁽²⁰⁾.

Otro experimento realizado en suelo Ferralítico Rojo cultivado con tomate e inoculado con *Glomus cubense* (Y. Rodr. & Dalpé) en formulación líquida ⁽²¹⁾, informó valores de GFE de 0,8 mg g⁻¹ siendo superiores al tratamiento no inoculado. Estos valores son bajos comparados con los de caña y pasto del presente estudio, pero son superiores a los detectados en los suelos cultivados con papa; lo cual confirma las diferencias que se manifiestan en este indicador debidas al cultivo.

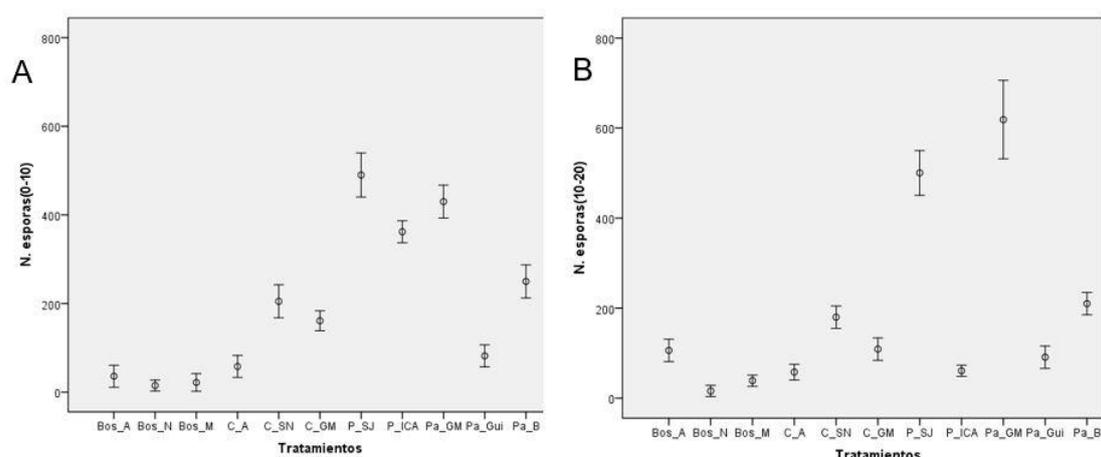
Además, trabajos de campo con maíz (*Zea mays* L.) informaron valores de GFE y GT de 0,745 y 5,8 g kg⁻¹, respectivamente ⁽²²⁾, en suelos negros (Chernozem, Phaeozem y Cambisols de acuerdo a la clasificación-16). De forma similar, estos valores se encuentran entre los obtenidos aquí para caña y pasto y los que presentaron los suelos cultivados con papa a la profundidad 0-10 cm. Lo que demuestra las diferencias en el comportamiento de estas variables biológicas relacionadas al cultivo y a condiciones edáficas.

Aunque no existen prácticamente evidencias de comparaciones entre las fracciones de glomalina a distintas profundidades, cabe resaltar un estudio de 360 muestras de suelo provenientes de 72 fincas donde se realizó un perfil vertical hasta 1 m de profundidad, cuyo resultado mostró un decrecimiento lineal de la glicoproteína de arriba hacia abajo asociado a las características físico-químicas y a los nutrientes del suelo ⁽²²⁾. Establecer una comparación entre éste y el presente trabajo no es apropiado puesto que la primera profundidad abarcó de 0-20 cm; no obstante, las diferencias detectadas aquí siguieron esta tendencia (Figuras 1 y 2) entre las profundidades evaluadas (0-10 y 10-20 cm).

El número de esporas de HMA en 50 g de suelo a las profundidades evaluadas osciló entre 15 y 620 (Figura 3). Los bosques presentaron valores bajos de esta variable en ambas profundidades, en el periodo de muestreo, lo que pudiera atribuirse a lo antes planteado respecto a la asociación preferencial de las especies arbóreas con hongos ectomicorrízicos ⁽¹⁸⁾. No obstante, se ha señalado que la ausencia de esporulación por parte de estos hongos no necesariamente indica ausencia de los mismos en el sitio, ya que pueden estar presentes

otras estructuras fúngicas como micelio los cuales son ricos en glomalina, y que la esporulación depende de factores espaciales, y estacionales, entre otros ⁽²³⁾.

En general en las áreas cultivadas (Figura 3), una zona de papa (Pa_GM) y las de pasto mostraron valores superiores del número de esporas de HMA; mientras que la caña de Aguacate (C_A) y la papa de Guïnes (Pa_Gui) manifestaron valores bajos. El resto de los suelos cañeros y la papa de Batabanó (Pa_B) presentaron valores intermedios. Es de destacar que esta variable evaluada a ambas profundidades manifestó una correlación positiva ($p=0,015$; $\alpha=0,05$). Sin embargo, no mostró correlación con las otras variables biológicas determinadas ni con las propiedades químicas de los suelos. Estos resultados están influenciados, en parte, por factores como son el manejo en cada una de estas áreas (laboreo, rotación de cultivos, riego, fertilización), el tiempo de establecidos los distintos cultivos y las variedades utilizadas; y principalmente por las condicionantes del proceso de esporulación antes mencionadas que caracteriza a estos hongos.



Bos_A- bosque Aguacate, Bos_N- bosque Nazareno, Bos_M- bosque Managua, C_A- caña Aguacate, C_SN- caña San Nicolás de Bari, C_GM- caña Güira de Melena, P_SJ- pasto Guayabal, P_ICA- pasto ICA, Pa_GM- papa Güira de Melena, Pa_Gui- papa Güines, Pa_B- papa Batabanó

Figura 3. Resultados del número de esporas de HMA en 50 g, a las profundidades 0-10 (A) y 10-20 (B) cm, de suelos Ferralíticos Rojos con diferente uso en las distintas localidades. Se muestran los intervalos de confianza (95 %)

En particular, numerosos trabajos realizados en pasto han mostrado diferentes resultados en el rendimiento y el número de esporas de HMA en función de la especie y del cultivar utilizados y, fundamentalmente, del manejo del mismo (cortes, riego, fertilizantes aplicados y dosis, etc) ⁽²⁴⁻²⁷⁾. Resultados similares se han obtenido en otros cultivos como yuca (*Manihot esculenta* Crantz), banano (*Musa* spp) y *Canavalia ensiformis* ⁽²⁸⁻³⁰⁾. Además, algunos autores plantean que las buenas prácticas agrícolas de manejo del suelo

tienden a incrementar los contenidos de GT y GFE^(11,31–33), entre las que señalaron el uso de abonos orgánicos o verdes y de bioproductos a base de Microorganismos eficientes, bacterias promotoras del crecimiento vegetal, rizobios u hongos beneficiosos.

Coincidentemente, un estudio realizado en 83 parcelas que presentaban de 10 a 20 años de cultivo de maíz, trigo (*Triticum vulgare* L.) o cebada (*Hordeum vulgare* L.) con o sin rotación ocasional de frijol (*Phaseolus vulgare* L.) o haba (*Vicia faba* L.); perennes: agapando (*Agapanthus* spp.), nopales (*Opuntia* spp.) y agave (*Agave* spp.); ornamentales: rosa (*Rosa* spp.), crisantemo (*Chrysanthemum* spp.), clavel (*Dianthus* spp.); frutales: zarzamora (*Rubus fruticosus* L.), frambuesa (*R. idaeus* L.), higuera (*Picus carica* L.), capulín (*Prunus serotina* Cav.), durazno (*P. persica* L.), donde se evaluaron 10 clases de manejo agronómico (incorporación/retiro de los residuos de cosecha, labranza convencional o no labranza, con o sin incorporación de abonos orgánicos, riego), se encontró que las condiciones de manejo influyeron de forma significativa en la acumulación del carbono orgánico estable (COS), la glomalina y el carbono de la glomalina (CG). También se observó una correlación del COS con la glomalina y con el CG⁽³⁴⁾.

Asimismo, se ha demostrado que la inoculación de los HMA (*Rhizophagus intraradices* y *Funneliformis mosseae*) y PGPR (*Pseudomonas mendocina*), en suelos degradados y bajo condiciones de sequía, promueven la formación y estabilidad de los agregados del suelo por parte de las poblaciones microbianas autóctonas de estos suelos al estimular su proliferación e incrementar las concentraciones de carbohidratos y de proteínas del suelo relacionadas a glomalina⁽⁷⁾. Trabajos como este confirman la importancia de realizar un diagnóstico certero en suelos agrícolas degradados, a través de propiedades físico-químicas y biológicas como se realizó en el presente estudio, con el fin de proponer alternativas ecológicas que contribuyan a su rehabilitación y a una productividad sostenida. De hecho, los resultados corroboraron que las fracciones de glomalina determinadas aquí pudieran considerarse indicadores biológicos de la calidad de los suelos y su grado de perturbación/degradación. En este sentido, la glomalina se ha reportado por algunos autores como un parámetro útil para monitorear la desertificación y el mejoramiento/rehabilitación de suelos degradados^(22,35) y se ha sugerido su estimación como indicador biológico de los suelos⁽³²⁾.

Respecto a la correlación que se encontró entre algunas de las variables evaluadas, se demostró estadísticamente que pH bajos y altos contenidos de C orgánico del suelo se asociaron a niveles elevados de GFE y GT en varios agrosistemas cultivados con maíz⁽²²⁾. Otro trabajo realizado en condiciones controladas también detectó una alta correlación positiva entre el contenido de C del suelo y el de GRSP⁽³²⁾. Ambos resultados

concuerdan con los de la GFE en esta investigación. No obstante, vale aclarar que la discrepancia en cuanto al comportamiento de la GT debe estar influenciada por la inclusión de ecosistemas naturales como los bosques en el análisis realizado aquí. De hecho, un estudio reciente informó que la contribución de la glomalina al C orgánico difirió de acuerdo al uso de la tierra y a la estacionalidad en los trópicos y que la relación entre el C de la glomalina y el C orgánico fue inferior en bosques en comparación con suelos dedicados a la agricultura ⁽³⁶⁾.

CONCLUSIONES

- Variables biológicas evaluadas pueden ser determinadas a la profundidad 0-10 o 0-20 cm manteniendo los resultados dada la correlación encontrada y entre ellas, las que determinan la glomalina constituyen mejores indicadores de la calidad del suelo que el número de esporas de HMA, dada su correlación con algunas variables químicas del suelo.
- Bosques mostraron valores superiores en la GT y GFE, seguidos por los cultivos de caña y pasto, mientras que los valores inferiores correspondieron a los suelos cultivados con papa. Tanto estos resultados, como los de las variables químicas revelaron diferencias en cuanto a las propiedades de los suelos analizados, siendo indicadoras del grado de perturbación/degradación de los mismos; lo que estuvo condicionado 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.
- Válido enfatizar las particularidades que conlleva cada análisis en dependencia del tipo de ecosistema, corroborándose que las relaciones entre los tipos de variables evaluadas pueden ser diferentes en los agroecosistemas y en los ecosistemas no perturbados como los bosques. Por lo que se sugieren investigaciones futuras para dilucidar los resultados obtenidos, principalmente en cuanto al uso de la glomalina como indicador biológico de la degradación/rehabilitación de los suelos según el ecosistema en estudio.

BIBLIOGRAFÍA

1. Lee SC, Idnurm A. Fungal sex: the Mucoromycota. *The Fungal Kingdom*. 2017;5(2):177–91.

2. Spatafora JW, Chang Y, Benny GL, Lazarus K, Smith ME, Berbee ML, et al. A phylum-level phylogenetic classification of zygomycete fungi based on genome-scale data. *Mycologia*. 2016;108(5):1028–46.
3. Smith S, Read D. *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press; 2008. 606 p.
4. Wright 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.
5. Gao W, Wang P, Wu Q-S. Functions and application of glomalin-related soil proteins: a review. *Sains Malaysiana*. 2019;48(1):111–9.
6. Zhu X-C, Song F-B, Xu H-W. Arbuscular mycorrhizae improves low temperature stress in maize via alterations in host water status and photosynthesis. *Plant and Soil*. 2010;5(5):591–3.
7. Kohler J, Caravaca F, Roldán A. Effect of drought on the stability of rhizosphere soil aggregates of *Lactuca sativa* grown in a degraded soil inoculated with PGPR and AM fungi. *Applied Soil Ecology*. 2009;42(2):160–5.
8. Helgason BL, Walley FL, Germida JJ. No-till soil management increases microbial biomass and alters community profiles in soil aggregates. *Applied Soil Ecology*. 2010;46(3):390–7.
9. Vodnik D, Grčman H, Maček I, Van Elteren JT, Kovačević M. The contribution of glomalin-related soil protein to Pb and Zn sequestration in polluted soil. *Science of the total environment*. 2008;392(1):130–6.
10. Jia X, Zhao Y, He Y, Chang Y. Glomalin-related soil protein in the rhizosphere of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings under higher air temperature combined with Cd-contaminated soil. *European Journal of Soil Science*. 2018;69(4):634–45.
11. Prasad M, Chaudhary M, Ramakrishnan S, Mahawer SK. Glomalin: a miracle protein for soil sustainability. *Indian Farmer*. 2018;5(9):1092–100.
12. 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.
13. Purin S, Rillig MC. The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin: Limitations, progress, and a new hypothesis for its function. *Pedobiologia*. 2007;51(2):123–30.
14. Singh PK, Singh M, Tripathi BN. Glomalin: an arbuscular mycorrhizal fungal soil protein. *Protoplasma*. 2013;250(3):663–9.
15. Hernández JA, Pérez JJM, Bosch ID, Castro SN. *Clasificación de los suelos de Cuba 2015*. Mayabeque, Cuba: Ediciones INCA. 2015;91.

16. FAO. IUSS working group WRB. World reference base for soil resources 2014, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. 2014;106.
17. Bradford MM. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical biochemistry. 1976;72(1-2):248-54.
18. Herrera RA, Ferrer RL, Furrázola E, Orozco MO. Estrategia de funcionamiento de las micorrizas VA en un bosque tropical. Biodiversidad en Iberoamérica. Ecosistemas, evolución y procesos sociales. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo. Subprograma, Diversidad Biológica. Mérida. 1995;250.
19. Gerdemann JW, Nicolson TH. Spore of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. Br. Mycol. Soc. 1963;46:234-44.
20. Morell F, Hernández A, Fernández F, Toledo Y. Caracterización agrobiológica de los suelos Ferralíticos Rojos lixiviados de la región de San José de las Lajas, en relación con el cambio en el manejo agrícola. Cultivos Tropicales. 2006;27(4):13-8.
21. Mujica Pérez Y, Mena Echevarría A, Medina Carmona A, Rosales Jenquis PR. Respuesta de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a la biofertilización líquida con *Glomus cúbense*. Cultivos tropicales. 2014;35(2):21-6.
22. Wang W, Zhong Z, Wang Q, Wang H, Fu Y, He X. Glomalin contributed more to carbon, nutrients in deeper soils, and differently associated with climates and soil properties in vertical profiles. Scientific reports. 2017;7(1):1-13.
23. Varela-Cervero S, Vasar M, Davison J, Barea JM, Öpik M, Azcón-Aguilar C. The composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities differs among the roots, spores and extraradical mycelia associated with five Mediterranean plant species. Environmental Microbiology. 2015;17(8):2882-95.
24. Cañizares PJG, Pedroso JFR, Espinosa RR, Jiménez AH, Flores GC. Effectiveness of inoculation of two forage legumes grown on two soil types with arbuscular mycorrhizal fungi. Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales. 2016;4(2):82-90.
25. González PJ, Ramírez JF, Rivera R, Hernández A, Plana R, Crespo G, et al. Management of arbuscular mycorrhizal inoculation for the establishment, maintenance and recovery of grasslands. Revista Cubana de Ciencia Agrícola. 2015;49(4):535-40.

26. Ramírez-Pedroso JF, González-Cañizares PJ, Salazar-Ruiz X, Llanes-Torres D, Rivera-Espinosa R, Hernández-Jimenez A, et al. Inoculación micorrízico-arbuscular y reducción de la fertilización orgánica y nitrogenada en *Megathyrus maximus* cv. Likoni. *Pastos y Forrajes*. 2017;40(2):108–17.
27. Rosales Jenqui PR, González Cañizares PJ, Ramírez Pedroso JF, Arzola Batista J. Selección de cepas eficientes de hongos micorrízicos arbusculares para el pasto guinea (*Megathyrus maximus* cv. Likoni). *Cultivos Tropicales*. 2017;38(1):24–30.
28. João JP, Rivera-Espinosa R, Martín-Alonso G, Riera-Nelson M, Simó-González J. Sistema integral de nutrición con HMA, abonos verdes y fertilizantes minerales en *Manihot esculenta* Crantz. *Cultivos Tropicales*. 2017;38(3):117–28.
29. Ruiz LA, Armario D, Rivera R, Espinosa A, Simó J, Espinosa E. Efecto de dosis de nitrógeno, fósforo y potasio combinadas con micorrizas en el cultivo del banano. *Agricultura Tropical*. 2016;2(1):1–8.
30. Martín-Alonso GM, Tamayo-Aguilar Y, Ramírez-Pedroso JF, Varela-Nualles M, Rivera-Espinosa R. Relación entre la respuesta de *Canavalia ensiformis* a la inoculación micorrízica y algunas propiedades químicas del suelo. *Cultivos Tropicales*. 2017;38(3):24–9.
31. Zhang J, Tang X, Zhong S, Yin G, Gao Y, He X. Recalcitrant carbon components in glomalin-related soil protein facilitate soil organic carbon preservation in tropical forests. *Scientific reports*. 2017;7(1):1–9.
32. Holtz EWF, Giuffré L, Ciarlo E, Cortinez AG. Glomalin and Its Relationship with Inoculation, Fertilization and Soils with Different Sand Proportion. 2018;11(2):24–32.
33. Sun L, Jing H, Wang G, Liu G. Nitrogen addition increases the contents of glomalin-related soil protein and soil organic carbon but retains aggregate stability in a *Pinus tabulaeformis* forest. *PeerJ*. 2018;6:5039.
34. 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.
35. Zhang Y, He X, Zhao L, Zhang J, Xu W. Dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin under *Psammochloa villosa* along a typical dune in desert, North China. *Symbiosis*. 2017;73(3):145–53.
36. Singh AK, Rai A, Pandey V, Singh N. Contribution of glomalin to dissolve organic carbon under different land uses and seasonality in dry tropics. *Journal of environmental management*. 2017;192:142–9.