

PARÁMETROS MICORRÍZICOS Y CALIDAD DEL SUELO EN CULTIVOS DE PAPAS NATIVAS E INTRODUCIDAS (MÉRIDA, VENEZUELA)

Maoly Márquez^{1*}, Alicia Cáceres¹, Ismael Hernández-Valencia²
y Licia Romero³

¹Instituto de Biología Experimental, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Caracas. Venezuela. ²Instituto de Zoología y Ecología Tropical, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Caracas. Venezuela. ³Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas. Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes. Mérida. Venezuela. *maolymarquezfv@gmail.com

RESUMEN

En el páramo de Gavidia, estado Mérida (Venezuela) se cultivan papas nativas (*Solanum tuberosum* pp. *andigenum*), las cuales se dan bajo un sistema tradicional, que incluye descansos largos del suelo y uso de enmiendas orgánicas. También se producen papas de la subespecie *tuberosum* (introducidas), en cuyo proceso de producción aplican fertilizantes químicos. En este sentido, se compararon estos sistemas agronómicos respecto a un bosque paramero. Se evaluó la micotrofia de los sistemas, cuantificando la colonización de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y hongos septados oscuros (HSO), la densidad de esporas de HMA y el número más probable de propágulos infectivos. También se analizó la calidad del suelo, usando indicadores físicos, químicos y biológicos. Los resultados destacan que hay colonización por HMA y HSO en las tres parcelas, la colonización por HMA es alta y no difiere entre localidades. La colonización por HSO es mayor en el suelo de papa introducida. El conjunto de indicadores de calidad del suelo (disponibilidad de agua y actividad microbiológica) refieren que el suelo del bosque paramero presenta mejor calidad a nivel físico y biológico. El contenido de nutrientes es mayor en las parcelas agrícolas. El análisis multivariado refleja que las parcelas de papas están relacionadas entre sí, pero respecto al bosque paramero, la parcela de papas nativas está más cercana a éste; pudiendo indicar que el manejo agronómico dado a éstas incide en menor grado sobre el bosque paramero.

Palabras clave: páramo, propiedades del suelo, micorrizas arbusculares, hongos septados oscuros, sostenibilidad.

Mycorrhizal parameters and soil quality in native potatoes and introduced potatoes crops at the Venezuelan Andes

Abstract

In paramo de Gavidia, Mérida state (Venezuela) both native and introduced potatoes are cultivated. Native potatoes (*Solanum tuberosum* spp. *andigenum*) are grown under a traditional system, which includes unplanted periods and the use of organic amendments. Production of potatoes of the

introduced subspecies *tuberosum*, by contrast, employs chemical fertilizers and a rest short period between harvests. Both agronomic systems were compared to a paramo forest. The microtrophy of the three system was evaluated quantifying the colonization of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), dark septate endophytes (DSE), AMF spores density, and the most probable number of infective propagules. Soil quality was also analyzed using physical, chemical, and biological indicators. Results indicate colonization by AMF and DSE in the three sites studied; colonization by AMF was high and did not differ between localities while colonization by DSE was higher in the introduced potatoes soil. Soil quality indicators (water availability and microbiological activity) indicated that the forest soil presented a superior quality both physically and biologically. Nutrient content was higher in the agricultural plots. A multivariate analysis showed that the potatoes sites were related to each other, with the plot of native potatoes closer to the reference area, indicating that traditional agronomic management affects to a lesser degree the paramo forests.

Keywords: Paramo, soil properties, arbuscular mycorrhizal fungi, dark septate endophytes, sustainability.

INTRODUCCIÓN

La agricultura intensiva es una de las actividades con mayor impacto ambiental, ya que requiere de un alto consumo de agua, nutrientes y energía, produce deforestación, pérdida de biodiversidad, proliferación de especies plagas y genera degradación de los suelos por erosión, pérdida de fertilidad, compactación, y contaminación con agroquímicos, entre otros. Ante la creciente degradación tierras producidas por la agricultura, se hace necesario evaluar las prácticas agrícolas existentes y desarrollar nuevas que impliquen no solo una producción sostenida en el tiempo, sino también con menor impacto ambiental y mayor equidad social respecto a la agricultura intensiva convencional (Altieri y Nicholls, 2000).

El suelo es un componente esencial de los agroecosistemas que refleja los cambios en el uso de la tierra y más específicamente de los manejos que se procuran para la producción agrícola. Por ello es preciso definir su estado para evaluar la sustentabilidad del mismo ante determinados cultivos y sus prácticas asociadas (Astier-Calderón *y col.*, 2002). En este sentido, se define como calidad del suelo al conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas de éste, que le proporcionan funciones en un ecosistema, como la capacidad que éste tiene para sostener la productividad biológica y mantener la calidad ambiental de tal forma que se promueva la salud vegetal, animal y humana; todo ello dentro de los límites que impone el ecosistema y el tipo de manejo que se le da (Doran y Parkin, 1994). Este concepto toma en cuenta, tanto las propiedades intrínsecas del suelo y sus interacciones, así como las relaciones del suelo con el medio ambiente, las plantas, los animales y los seres humanos. Además, al incorporar el aspecto de producción sostenida en el largo plazo, se incluye implícitamente la búsqueda de estrategias de manejo que formen parte de un modelo de agricultura sostenible (Astier-Calderón *y col.*, 2002).

A diferencia de los estudios tradicionales de fertilidad del suelo, a los estudios de calidad de suelos se han integrado las propiedades biológicas, como la actividad microbiana y la densidad de organismos, ya que estos cumplen un papel fundamental en las transformaciones de la materia orgánica, el ciclaje de nutrientes y la estabilidad de los agregados de suelo y además son sensibles a las prácticas de manejo (Jeffries *y col.*, 2003). Por otra parte, algunos microorganismos como los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) establecen asociaciones benéficas con las plantas, que permiten tolerar condiciones de estrés hídrico y nutricional, altas concentraciones de compuestos tóxicos y presencia de patógenos (Bago *y col.*, 2000; Cuenca *y col.*, 2007).

En el páramo de Gavidia, estado Mérida (Venezuela) se mantiene el sistema de cultivo tradicional de papas nativas (*Solanum tuberosum* ssp. *andigenum*), lo cual es importante en la región, ya que está asociado a un componente sociocultural de relevancia, declarada como “Bien de Interés Cultural de la Nación” en 2015. En estos cultivos el uso de fertilizantes inorgánicos es bajo, con uso de fertilizantes orgánicos, hay rotación de rubros y el descanso del suelo es de tres meses (Romero y Monasterio, 2005). En contraste, el proceso de cultivo de la spp. *tuberosum* (especie de papa introducida) es de ciclos de producción cortos, con descanso del suelo de dos meses y exigente a nivel nutricional, sobrepasando los 400 kg/ha de fertilizantes químicos (Villa y Sarmiento, 2009). El interés por la preservación de las papas nativas y el control de la franja agrícola en el páramo venezolano, data de hace más de dos décadas y al respecto se han descrito desde las diferentes variedades de papas nativas presentes en la región (Romero y Monasterio, 2005), hasta la dinámica del N, P y C en el suelo como indicadores de la restauración de la fertilidad, así como los cambios de las comunidades microbianas y la actividad de las mismas en el suelo cultivos de papa tradicional e introducida (Llambí y Sarmiento, 1998; Montilla *y col.*, 2002; García, 2010).

La conservación de la fertilidad y productividad de los suelos es un objetivo primordial para alcanzar la sostenibilidad de un agroecosistema. Para ello es necesario contar con indicadores que proporcionen información sobre los cambios en las propiedades del suelo cuando es sometido a diferentes condiciones de manejo e identificar aquellas prácticas que generan el menor impacto socioambiental. Tomando en cuenta lo anterior, en el presente estudio se realizó una comparación en dos sistemas con manejos agronómicos de papa (nativa e introducida) respecto a una referencia (bosque paramero), conjugando el análisis micorrízico con la determinación de indicadores de calidad de suelo asociados a la productividad, a fin de comprender los cambios producidos cuando los métodos de cultivo son diferentes y determinar cuál sistema se aproxima a lo que se considera sustentable.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Valle de las Piñuelas, Páramo de Gavidia (Mérida, Venezuela), entre 3300 y 3600 msnm, con una temperatura media anual entre 8-10°C y precipitación de 1300 mm distribuida en forma bimodal (época seca entre noviembre y marzo) (INAMEH, 2016). En la zona predominan cultivos de cereales, ajo, zanahorias y papa, así como el pastoreo extensivo (ganado vacuno). Se consideraron tres unidades de estudio de 0,25 ha cada una: (a) Una parcela cultivada en forma tradicional con papas nativas (PN) de la variedad Guadalupe o Arbolona blanca, sin aplicación de insumos químicos (8°40'02"N, 70°54'48"O, 3528 msnm), (b) una parcela cultivada con papas introducidas (PI) variedad Andinita, con utilización alta de insumos pero sin aplicación de fungicidas ni herbicidas (8°40'01"N, 70°54'48"O, 3363 msnm) y (c) un área de referencia constituida por vegetación de bosque paramero, en donde dominan plantas leñosas (BR) (8°39'56"N, 70°54'43"O, 3363 msnm). En las localidades con cultivo de papas, no hay especies arbóreas, ni arbustivas, solo destaca la presencia de hierbas de las familias Poaceae, Asteraceae y Brassicaceae. Un resumen de las características y manejos de las tres parcelas se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Manejos agronómicos en los sistemas de producción de papas evaluados.

Especie	Papa nativa: Gudalupe (Arbolona blanca) <i>Solanum tuberosum</i> spp. <i>andigenum</i>	Papa introducida: Andinita <i>Solanum tuberosum</i> spp. <i>tuberosum</i>
Rotación de cultivos	Sí: Avena, trigo, brócoli, ajo, papa	No
Descanso entre siembras	3 meses	2 meses
Ciclo de cultivo (meses).	7-9. 1 cosecha por año	4. 2-3 cosechas por año
Labranza	Arado con bueyes	Arado con bueyes
Abonos orgánicos	Gallinaza: 5.600Kg/ha	Gallinaza: 5.600Kg/ha
Siembra	45-60 días posteriores a la aplicación de enmiendas orgánicas (Mayo)	30 días posteriores a la aplicación de enmiendas orgánicas (Enero-Mayo-Agosto)
Fertilización química	No hay	N,K,P, Ca, Sulfatos: 400Kg/ha
Rendimiento.	10.000Kg/ha	10.000Kg/ha
Duración postcosecha	9 meses	2 meses

El muestreo se realizó en época seca (diciembre), en período postcosecha (2 semanas) de ambos cultivos de papas. Para evaluar la calidad de suelo, se efectuó un muestreo aleatorio simple en cada parcela,

tomando 25 muestras a una profundidad de 0-20 cm, conformando posteriormente 5 muestras compuestas. En cuanto al estudio micorrízico, se colectaron aleatoriamente 3 muestras de suelo de cada localidad para determinar la micotrofia del sistema. Las muestras para análisis biológicos fueron refrigeradas a 4°C hasta realizar las respectivas determinaciones en simultáneo.

Como indicadores físicos se analizó el contenido de humedad (Rhoades, 1982), la capacidad de campo (Klute, 1986) y la textura (Bouyoucos, 1962). En la evaluación de los indicadores químicos se determinó el pH en una relación agua:suelo de 2,5:1, el carbono orgánico-materia orgánica (Baker, 1976), el nitrógeno total y el fósforo disponible (Bremner, 1960; Anderson e Ingram 1992). Respecto a los indicadores biológicos, se evaluó la respiración basal (Alef y Nannipieri, 1995), el carbono microbiano (Anderson y Domsch, 1978), la actividad de la enzima deshidrogenasa (Casida *y col.*, 1964. Modificado por Paolini, 2011) y la actividad de la fosfatasa ácida (Tabatabai y Bremner, 1969. Modificado por Paolini, 2011).

La colonización micorrízica se determinó mediante el aclarado con KOH, acidificación con HCl y tinción con azul de tripano (Phillips y Hayman, 1970). Las raíces teñidas se evaluaron al microscopio óptico para cuantificar la presencia o ausencia de estructuras fúngicas por el método de Mc. Gonigle *y col.* (1990). A través de esta metodología, también se observaron y cuantificaron las estructuras dematiáceas de los hongos septados oscuros (HSO). La evaluación de la densidad de esporas micorrízicas arbusculares, se realizó según el método de tamizado húmedo, decantado y centrifugación en sacarosa (Sieverding, 1991). Se cuantificó el número más probable de propágulos infectivos (NMP) de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y HSO, de acuerdo al método de Porter (1979) modificado por Sieverding (1991).

Los resultados se evaluaron estadísticamente, comprobando la homocedasticidad, posteriormente se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANOVA). Adicionalmente se determinó el índice de Bray-Curtis (Brower *y col.*, 1984), como medida de la similitud entre las localidades. Lo anterior, fue realizado a través del programa estadístico Past 3.X (Hammer *y col.*, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al contrastar los valores obtenidos entre el bosque de referencia y las localidades postcosecha, se puede apreciar diferencias en la calidad del suelo y el estatus micorrízico.

En los indicadores físicos de calidad de suelo, se detalla que la textura de los suelos es franco-arenosa. Respecto a la capacidad de campo y el contenido de humedad, el bosque paramero presentó los mayores valores (Tabla 2). Cuando la vegetación silvestre es remplazada por cultivos en bosque parameros venezolanos, hay aumento de la evapotranspiración producto de los manejos agronómicos, principalmente el arado, constituyendo el 66,0 % de las salidas totales de agua del sistema (Sarmiento, 2000), lo cual se evidencia en el cambio del contenido de humedad.

Tabla 2. Indicadores de calidad de suelo. BR: Bosque paramero de referencia. PN: Suelo bajo cultivo de papa nativa. PI: Suelo bajo cultivo de papa introducida. Subíndices diferentes indican diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0,05$).

Localidad	BR	PN	PI
Textura	Franco-arenosa	Franco-arenosa	Franco-arenosa
Capacidad de campo (gH ₂ O.g suelo ⁻¹)	1,2 _a	0,8 _b	0,6 _c
Contenido de humedad (%)	55,8 _a	35,53 _b	23,5 _c
pH	4,1 _a	4,7 _b	5,01 _c
Contenido de materia orgánica (%)	18,3 _a	16,2 _a	17,2 _a
N total (%)	0,6 _a	0,7 _{ab}	0,8 _b
Relación C:N	19,6 _a	14,1 _{ab}	12,4 _b
P disponible (ppm)	4,1 _a	88,1 _b	37,7 _c
Relación C:P	35062,2 _a	1200,7 _b	2546,0 _c
Respiración basal (mgCO ₂ .kg suelo ⁻¹ .d ⁻¹)	39,5 _a	30,9 _a	7,3 _b
Carbono microbiano (mg C.kg suelo ⁻¹)	933,8 _a	557,8 _b	520,2 _b
qCO ₂ (mgCO ₂ .mg C ⁻¹ .d ⁻¹)	0,04 _a	0,05 _a	0,02 _b
Actividad de la deshidrogenasa (µm TPF. g ⁻¹ .d ⁻¹)	0,03 _a	0,01 _b	0,004 _c
Actividad de la fosfatasa ácida (µm p-NF. g ⁻¹ .h ⁻¹)	19,3 _a	13,1 _{ab}	8,9 _b

Los pH del suelo de cada localidad difieren entre sí (Tabla 2), el suelo del bosque paramero es extremadamente ácido (4,1) (USDA, 1998), mientras que el suelo de las parcelas de papas nativas presenta pH de 4,7 y el área con producción de papas introducidas 5,1, clasificándose ambos como fuertemente ácido. El incremento de pH se asocia a la gallinaza aplicada que tiene un valor de pH de 7,8 (Machado y Sarmiento, 2012; Vergara *y col.*, 2015), en el caso de PI la aplicación de fertilizantes inorgánicos también contribuye al incremento del pH. El contenido de materia orgánica y carbono orgánico, en los tres sistemas es alto.

El contenido de materia orgánica en las localidades no se diferenció estadísticamente entre sí. El mayor valor se registró en PI, mientras que PN presentó valores significativamente intermedios con las otras localidades. En los suelos bajo cultivos de papa se esperaba una reducción en el contenido de materia orgánica debido al arado y a la estimulación de la actividad microbiana por la fertilización; sin embargo, los aportes de gallinaza pudieron compensar las pérdidas, más cuando ésta posee gran parte del carbono en un compartimiento recalcitrante que tiende a mineralizarse más lentamente (Machado y Sarmiento, 2012; Vergara *y col.*, 2015).

El nitrógeno total varió significativamente entre las localidades estudiadas, el mayor valor se registró en PI, mientras que PN presenta valores significativamente intermedios con las otras localidades; se obtuvo una alta relación carbono-nitrógeno en el bosque paramero y en PN, dicha tasa puede considerarse óptima en PI. El P disponible es significativamente menor en BR (Tabla 2), con valores de 4,1 ppm (muy baja disponibilidad); seguido de PI con una disponibilidad muy alta de 37,7 ppm, mientras que PN tiene un contenido de fósforo muy alto (88,1 ppm) (PNUD-INFAT, 2002). La relación carbono-fósforo varió significativamente entre las áreas de estudio.

Al respecto, se puede destacar que la gallinaza posee un contenido de N de 2,93% y de P de 3180 ppm (Machado y Sarmiento, 2012; Vergara *y col.*, 2015), que de igual forma justifica los incrementos observados en el contenido de N total para el cultivo de papas introducidas y de P disponible, tanto para papas nativas como introducidas. Los cambios en la relación C:N coincide con lo reportado por Llambí y Sarmiento (1998) con la conversión del bosque paramero a cultivos de papas introducidas. En el bosque paramero la materia orgánica, presenta un cociente muy alto en la relación C:N, indicando una mayor inmovilización de N por los microorganismos (Martens *y col.*, 2003). Los valores de la relación C:P superan a lo señalado en la bibliografía para que ocurra mineralización del P (C:P=200-300) (Fuentes, 1999), lo cual indica que en las tres áreas de estudio predomina la inmovilización del fósforo.

Detallando los resultados de los indicadores biológicos, se encuentra que en la respiración basal (Tabla 2), no hay diferencias significativas entre BR y PN, mientras que PI presenta el menor valor (7,3 mgCO₂.kg suelo⁻¹.d⁻¹). Estos valores indican que tanto en BR y PN, hay mayor y actividad microbiana. Los resultados son comparables con otros reportes de la región, en donde destacan que no hay cambios significativos en la respiración en la conversión bosque paramero - cultivo tradicional de papa (García, 2010).

Los datos de carbono microbiano, refieren que hay mayor biomasa de microorganismos del suelo presentes en el bosque referencia (933,8mg C.kg suelo⁻¹), las áreas con manejos agrícolas, no presentaron diferencias entre ellas. En las áreas cultivadas disminuyen la biomasa microbiana posiblemente asociado a los procesos de labranza y a la fertilización química, que afectan la regeneración de la microbiota produciendo una modificación de la comunidad microbiana en cuanto a estructura y función (Cruz *y col.*, 2012).

El coeficiente metabólico es menor en la zona con un manejo agronómico comercial (0,02mgCO₂. mg C⁻¹.d⁻¹), respecto a BR y PN, que no presentan diferencias estadísticas entre sí. Lo anterior permite confirmar que la disponibilidad de nutrientes, a través de la mineralización de la materia orgánica, tanto en el bosque paramero es menor y en el cultivo de papas nativas, por lo que una mayor cantidad de carbono debe ser mineralizado, dada la falta de fuentes alternativas de nitrógeno (Sarmiento y Bottner, 2002), lo que se traduce en una mayor actividad de los microorganismos. Mientras que en la zona de papas introducidas, la fertilización química y la gallinaza, constituyen una fuente lábil de nutrientes, de allí que el qCO₂ reflejado sea menor. Situación similar se describe en otras conversiones del bosque paramero de la región (García, 2010).

La actividad de la deshidrogenasa, medida que expresa la mayor capacidad oxidativa sobre la materia orgánica, presentó una tendencia a la disminución de la actividad enzimática al ir del bosque paramero (0,03 μm TPF. g⁻¹.d⁻¹) a la localidad con un manejo agronómico comercial (0,004 μm TPF. g⁻¹.d⁻¹) (Tabla 2). Lo anterior puede asociarse a que en el bosque paramero, hay mayor biomasa microbiana, mientras que la localidad de papas introducidas presenta el menor valor. Tendencia similar reportan Avellaneda-Torres *y col.* (2018), al señalar que hay una disminución de la actividad de la enzima deshidrogenasa en suelos bajo cultivos de papas respecto al páramo. En cuanto a la comparación de los manejos agronómicos, los datos coinciden con lo destacado por Järvan *y col.* (2014), con lo que se deduce, que el uso de fertilizantes químicos afecta negativamente la calidad biológica del suelo, ya que la actividad de la microbiota asociada a la mineralización de la materia orgánica disminuye.

En cuanto a la actividad de la fosfatasa ácida del suelo, se observa que hay mayor actividad de la fosfatasa ácida en el bosque paramero (19,3μm p-NF. g⁻¹.h⁻¹) en comparación a las áreas bajo los cultivos de las diferentes especies de papa. Al respecto, se tiene que a bajos pH la disponibilidad de fósforo se reduce, incrementándose la producción de fosfatasas ácidas por parte de microorganismos y raíces, en la mineralización de PI (Dalurzo *y col.*, 2005). Resultados similares destacan Gálviz *y col.*, (2007), quienes encuentran que hay mayor actividad de la fosfatasa ácida en suelos no

intervenidos en los Andes colombianos. Al contrastar los diferentes sistemas de cultivo, se detalla como PI presenta el menor valor; la mayor disponibilidad de P en los suelos de papas introducidas, actúa como un retroalimentador negativo que inhibe la actividad de la enzima (Fernández y Lafuente, 2013). Lo anterior es comparable a lo señalado por Qin *y col.* (2017), que refieren que la actividad de esta enzima disminuye en sistemas continuos de papa en comparación a sistemas con rotación de cultivos.

Respecto a las interacciones evaluadas, destaca que el porcentaje de colonización micorrízica es alto, superando el 50% (Ferrer y Herrera, 1988) y no presentan diferencias significativas (Tabla 3), entre las estructuras de HMA destaca el predominio de hifas, seguido de las vesículas, enrollados hifales y arbusculos; solo se presentaron diferencias significativas en la proporción de vesículas (Tabla 3), así mismo se registró que el NMP de HMA, >520 propágulos por 100 g de suelo (Habte y Osorio, 2001). Por lo tanto, la micotrofia de las tres localidades (PMA y NMP) no se ve afectada por los diferentes tipos de manejo. La micotrofia en las parcelas agrícolas está asociada a la alta micotrofia del cultivo (McArthur y Knowles, 1993), que podría estimular el crecimiento del hongo o recuperación y mantenimiento del inóculo nativo. La presencia de arbusculos y enrollados en las tres localidades, indican funcionalidad de la simbiosis, ya que estas estructuras se consideran de intercambio nutricional. Sin embargo, hay que considerar que la funcionalidad de la simbiosis se corrobora por métodos bioquímicos que determinan la viabilidad de las estructuras (van Aarle *y col.*, 2005).

Tabla 3. Análisis micorrízico arbuscular y de HSO. BR: Bosque paramero de referencia. PN: Suelo bajo cultivo de papa nativa. PI: Suelo bajo cultivo de papa introducida. Subíndices diferentes indican diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0,05$).

Localidad	BR	PN	PI
PMA (%)	61,5 _a	66,4 _a	66,1 _a
Hifas (%)	56,2 _a	66,5 _a	60,9 _a
Arbusculos (%)	7,1 _a	5,6 _a	6,1 _a
Vesículas (%)	32,6 _a	16,3 _b	16,6 _b
Enrollados hifales (%)	13,3 _a	14,5 _a	19,7 _b
Densidad de esporas (N° de esporas. 100g suelo ⁻¹)	579,9 _a	481,4 _a	233,3 _b
Hongos septados oscuros (%)	11,4 _a	4,0 _b	20,1 _c
NMP-HMA (N° propágulos colonizadores.100g suelo ⁻¹)	474.785,9 _a	258.248,4 _a	353.992,6 _a
NMP-HSO (N° propágulos colonizadores.100g suelo ⁻¹)	1853,9 _a	2,9 _b	12,4 _b

La densidad de esporas en el bosque paramero y en el cultivo con papa nativa no presentaron diferencias significativas entre sí (530,6 esporas. 100 g suelo seco⁻¹), la densidad de esporas es 2,3 veces menor en el suelo de papa introducida (Tabla 3). Este resultado en el bosque paramero, puede relacionarse no solo a la ausencia de perturbación antrópica, sino también a la mayor diversidad de especies vegetales presentes, que puede favorecer el desarrollo de las comunidades de HMA (Johnson y Wedin, 1997). Resultados similares reportan en el Parque Nacional Chingaza en Colombia respecto al bosque paramero El Granizo, en el cual hay fuerte intervención antrópica (García *y col.*, 2004). La disminución del número de esporas en los suelos de manejo agronómico comercial, puede atribuirse a la poca vegetación hospedera y al arado constante. Aunado a ello, se ha reportado que la fertilización química nitrogenada disminuye la diversidad fúngica y la eficiencia mutualista de los HMA (Duchicela y González, 2003).

Se registró una mayor y significativa colonización de HSO en la parcela de papa introducida (Tabla 3), la cual presenta menor calidad biológica del suelo, registrando menores valores de respiración basal y actividad enzimática, considerando esto, es de resaltar que los HSO, son nutricionalmente importantes en ecosistemas bajo diferentes tipo de estrés (Jumpponen y Trappe, 1998). Los valores de propágulos de HSO en el bosque paramero de referencia presentan el valor más alto y significativo con 1853,9 N° propágulos colonizadores por 100 g suelo, lo que podría indicar que las primeras fases de desarrollo de esta simbiosis se ven favorecidas en las condiciones de este suelo. Diversas investigaciones reportan HSO en la cordillera de los Andes (Schmidt *y col.*, 2008; Urcelay *y col.*, 2011), en Venezuela, se había reportado la presencia de HSO en zonas relacionadas a la alta concentración de elementos tóxicos para las plantas; como en el ecotono y la sabana de Loma de Níquel (Aguirre, 2012).

Articulando la calidad de suelo y la micotrofia de los sistemas, a través del índice de Bray-Curtis (Tabla 4), se detalla como las localidades bajo cultivos son más similares entre sí, lo cual es acorde tomando en cuenta que la especie cultivada es la misma. La zona productora de papas nativas presenta un valor más cercano a la unidad respecto al bosque de referencia, con esto y aunado a los datos de calidad biológica del suelo obtenidos, se podría referir que este manejo agronómico incide en menor grado sobre el ecosistema. Dicha tendencia ha sido reportada por García (2010) en otros bosques parameros de la región, aplicando diversos análisis multivariados.

Tabla 4. Índice de Bray-Curtis para las localidades. Bosque paramero de referencia. PN: Suelo bajo cultivo de papa nativa. PI: Suelo bajo cultivo de papa introducida.

	BR	PN	PI
BR	1	0,913	0,894
PN	0,913	1	0,941
PI	0,894	0,941	1

En general, Duan *y col.* (2011) destacaron que los cambios en la calidad del suelo podrían no afectar de manera drástica a los HMA, producto en parte de la alta adaptabilidad micorrízica, el contexto biótico de los mismos y como las plantas y HMA optimizan los recursos antes diferentes perturbaciones (Johnson *y col.*, 2013). De allí, que las diferencias entre las localidades al aplicar el índice de Bray-Curtis, no superan el 11% entre las mismas, ya que el componente micorrízico tiene un rol preponderante en las 3 zonas. Resultados similares se han registrado al analizar manejos agronómicos contrastantes en el cultivo de papas (Larking *y col.*, 2012).

Debido a que no existe un consenso en la definición de calidad de suelos, tampoco existe un consenso sobre lo que debe ser considerado un suelo de máxima calidad (Gil-Sotres *y col.*, 2005, Büenemann *y col.*, 2018). Los diferentes enfoques sobre lo que es un suelo de máxima calidad pueden ser resumidos en dos opciones. El primero considera que un suelo de máxima calidad es aquel que se encuentra en equilibrio con todos los componentes del ambiente, como el caso de los suelos que se desarrollan con vegetación climax. El segundo considera a aquellos suelos con máxima productividad y mínima degradación ambiental (Gil-Sotres *y col.*, 2005). Como puede observarse estos enfoques ecológicos y agronómicos pueden ser no concordantes, ya que muchos ecosistemas silvestres con vegetación climax usualmente presentan baja fertilidad química y en consecuencia no suelen ser altamente productivos, a menos que se apliquen fertilizantes y otros insumos. En nuestro caso de estudio se deriva que desde el punto de vista ecológico, el bosque paramero presenta la mayor calidad del suelo que destaca por mayor disponibilidad de agua y actividad biológica. El establecimiento de cultivos de papas, tanto introducidas como nativas, genera un cambio en los suelos, siendo más marcado en los suelos con papas introducidas en donde la fertilidad química es mayor, pero la actividad biológica disminuye respecto al bosque paramero. Desde el punto de vista de la calidad química, así como desde el enfoque económico, los suelos bajo cultivo de papas introducidas tienen una mayor calidad; sin embargo produce degradación ambiental.

CONCLUSIONES

A través de los indicadores de calidad del suelo se aprecia que los cultivos de papas (nativas e introducidas), producen cambios en las propiedades del mismo, siendo menos marcados en la parcela de papas nativas, y en consecuencia se puede concluir que el manejo agronómico bajo el cual se producen estas papas es más sostenible desde el punto de vista ecológico.

La micotrofia dada por los HMA en los sistemas estudiados indica la existencia de especies altamente micotróficas tanto en el bosque paramero como en las dos zonas bajo manejos agronómicos. La presencia de HSO fue

mayor en la parcela de papa introducida, la cual presentó menor calidad del suelo a nivel físico y biológico. Así mismo, se puede indicar que el desarrollo de estas interacciones, es clave para el desarrollo, funcionamiento y mantenimiento de un ecosistema natural o un sistema agrícola sustentable.

LITERATURA CITADA

- Aguirre, I. 2012. Estudio de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y los hongos septados oscuros (HSO), y su relación con el suelo, en dos litologías diferentes en la localidad de Loma de Hierro, estado Aragua. Tesis de Licenciatura. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Alef, K. y P. Nannipieri. 1995. Soil microbiology and biochemistry. Primera edición. Nueva York, Academic Press, Inc., 608 pp.
- Altieri, M y C. Nicholls. 2000. *Agroecología Teoría y práctica para una agricultura sustentable*. 1era Ed. Ciudad de México, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente., 250 pp.
- Anderson, J. y K. Domsch. 1978. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil. *Soil. Biol. Biochem.* 10: 215-221.
- Anderson, J. y J. Ingram. 1992. *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. 2da Ed. Oxford, C.A.B., 171 .
- Astier Calderon, M., Maass-Moreno, M. y Etchevers-Barr, J. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36: 605-620.
- Avellaneda-Torres, L., T. Sicard y E. Rojas. 2018. Impact of potato cultivation and cattle farming on physicochemical parameters and enzymatic activities of Neotropical high Andean Páramo ecosystem soils. *Sci. Total. Envir.* 631:1600-1610.
- Bago, B., C. Azcón-Aguilar, Y. Shacker y P. Pflieger. 2000. El micelio externo de la micorriza arbuscular como puente simbiótico entre la raíz y su entorno. En: A. Alarcón, R. Ferrera (Eds.), *Ecología, fisiología y biotecnología de la micorriza arbuscular*. IRENAT- Colegio de Postgraduados. Mundi Prensa. Primera edición. Montecillo, México. pp. 78-92.
- Bouyoucos, G. 1962. Hydrometer methods improved for marking particle size analysis of soil. *Agron. J.* 54: 464-465.
- Baker, K. 1976. The determination of organic carbon in soil using a probe colorimeter. *Lab. Practice.* 25: 82-83.
- Bremner, J. 1960. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *J. Agric. Sci.* 55(1): 11-33.
- Brower, J., J. Zar y C. Von Ende. 1984. *Field and laboratory methods for general ecology*. Wm. C, Brown Co. Primera edición. Dubuque, Estados Unidos.
- Bünemann, E. K., G. Bongiorno., Z. Bai., R.E. Creamer., G. De Deyn., R. de Goede., L. Fleskens., V. Geissen., T.W. Kuyper., P. Mäder., M. Pulleman., W. Sukkel., J.W. van Groenigen y L.Brussaard. 2018. Soil quality: A critical review. *Soil Biol. Biochem.* 10: 105-125.
- Casida, L., D. Klein y T. Santoro. 1964. Soil dehydrogenase activity. *Soil. Sci.* 98: 371-376.
- Cruz, A., E. Cruz., L. Aguilera., H. Norman., S. Maass., G. Nava., L. Dendooven y otros. 2012. La biomasa microbiana en suelos de montaña con diferentes usos: un estudio de laboratorio. *Tierra. Lat.* 30(3): 221-228.

- Cuenca, G., A. Cáceres., G. Oidobro., Z. Hasmy y C. Urdaneta. 2007. Las micorrizas arbusculares como alternativa para una agricultura sustentable en áreas tropicales. *Interciencia* 22(1): 23-29.
- Daluzo, H., D. Toledo y S. Vásquez. 2005. Estimación de parámetros químicos y biológicos en oxisoles con uso citrícola. *Ci. Suelo* (Argentina). 23(2): 159-165.
- Doran, J. y T. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. In: J. Doran, D. Coleman, B. Stewart (Eds.), *Defining and assessing soil quality for sustainable environment*. Soil Science Society of America. Special Publication 35. Primera edición. Madison, Wisconsin. pp. 1-21.
- Duan, T., E. Facelli., S. Smith y Z. Nan. 2011. Differential effects of soil disturbance and plant residue retention on function of arbuscular mycorrhizal (AM) symbiosis are not reflected in colonization of roots or hyphal development in soil. *Soil. Biol. Biochem.* 43: 571-578.
- Duchicela, J. y M. González. 2003. *La micorriza arbuscular en el contexto de la agricultura sustentable*. Monografía CEINCI -02-03. ESPE. Quito, Pichincha.
- Fernández, S. y F. Lafuente. 2013. Actividad de la fosfatasa ácida y alcalina en un ultisol y en un alfisol fertilizados con diferentes fuentes de fósforo. XX Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. San Juan de los Morros, Venezuela
- Ferrer, R. y R. Herrera 1988. Micotrofia en Sierra del Rosario. En: R. Herrera, L. Menéndez, M. Rodríguez, E. García (Eds.), *Ecología de los bosques siempreverdes de Sierra del Rosario, Cuba*. Proyecto Mab #1. UNESCO. Primera edición. La Habana.
- Fuentes, J. 1999. *El suelo y los fertilizantes*. Mundi Prensa. Quinta edición. Madrid.
- Gálviz, C., H. Burbano y C. Bonilla. 2007. Actividad de la fosfatasa ácida en suelos cultivados con papa y praderas del corregimiento de Catambuco, Pasto-Colombia. *Acta. Agron.* (Colombia). 56(1): 13-16.
- García, E. 2010. Efecto de la conversión de ecosistemas naturales en agroecosistemas sobre las comunidades microbianas del suelo en Los Andes venezolanos. Tesis Doctoral. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- García, J., D. García y M. Correa. 2004. Incidencias de las micorrizas arbusculares y vesículo arbusculares como estrategia adaptativa de especies de bosque paramero y selva altoandina, cordillera oriental de Colombia. *Colomb. Forest.* 8(17): 43-59.
- Gil-Sotres, F., C. Trasar-Cepeda., M.C. Leiros y S. Seoane. 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil. Biol. Biochem.* 37:877-887.
- Habte, M. y N. Osorio. 2001. *Arbuscular mycorrhizas: Producing and applying arbuscular mycorrhizal inoculum*. 1era Ed. Manoa, CTAHR., 47 pp.
- Hammer, Ø., D. Harper y P.Ryan. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontol. Electronica.* 4(1): 1-9.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH). <http://www.inameh.gob.ve/web/climatologia2/climatologia.php> [Consulta: 21 de enero de 2016].
- Järvan, M., L. Edesi., A. Alamson y A. Vösa. 2014. Soil microbial communities and dehydrogenase activity depending on farming systems. *Plant. Soil. Environ.* 60:459-463.
- Jeffries, P., S. Gianinazzi., S. Perotto., K. Turnau y J. Barea. 2003. The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Biol. Fertil. Soil.* 37: 1-16.
- Johnson, N., C., Angelard., I. Sanders y T. Kiers. 2013. Predicting community and ecosystems of mycorrhizal responses to global change. *Ecol. Letters* 16:140-153.

- Johnson, N. y D. Wedin. 1997. Ecological society of America soil carbon, nutrients, and mycorrhizae during conversion of dry tropical forest to grassland. *Ecol. Appl.* 7(1): 171-182.
- Jumpponen, A. y J. Trappe. 1998. Dark septate endophytes: a review of facultative biotrophic root- colonizing fungi. *New. Phytol.* 140: 295-310.
- Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory methods. En: A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis, part 1*. American Society of Agronomy, Inc. Segunda edición. Madison, Estados Unidos.
- Larkin, R., W. Honeycutt., O. Olanya., J. Halloran y Z. He. 2012. Impacts of crop rotation and irrigation on soil borne diseases and soil microbial communities. En: H. Zhongqi, R. Larkin, W. Honeycutt (Eds.), *Sustainable potato production: Global case studies*. Springer Science Business Media. Primera edición. Nueva York.
- Llambí, L. y L. Sarmiento. 1998. Biomasa microbiana y otros parámetros edáficos en una sucesión secundaria de los bosques parameros venezolanos. *Ecotrópicos* 11(1): 1-14.
- Machado, D. y L. Sarmiento. 2012. Respuesta del cultivo de papa a la combinación de diferentes fuentes de fertilización nitrogenada: Evaluando la hipótesis de la sincronización. *Bioagro.* 24(2): 83-92.
- Martens, D., T. Reddy y D. Lewis. 2003. Soil organic content and composition of 130-year crop, pasture and forest land-use managements. *Glob. Change. Biol.* 10:65-78.
- McArthur, D. y R. Knowles. 1993. Influence of species of vesicular-arbuscular mycorrhizal phosphorus nutrition on growth, development and mineral nutrition of potato (*Solanum tuberosum*). *Plant. Physiol.* 102(3): 771-782.
- McGonigle, T., M. Miller., D. Evans., G. Fairchild y J. Swan. 1990. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New. Phytol.* 115(3): 495-501.
- Montilla, M., R. Herrera y M. Monasterio. 2002. Influencia de los períodos de descanso sobre la distribución vertical de raíces, micorrizas arbusculares y pelos radicales en bosque parameros andinos venezolanos. *Ecotrópicos* 15(1): 85-98.
- Paolini, J. 2011. *Modificación de metodologías de enzimas del suelo*. Mimeografiado. Altos de Pipe, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas., 85 pp.
- Phillips, J. y D. Hayman. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Br. Mycol. Soc.* 55: 158-161.
- PNUD-INIFAT. 2002. *Manual para la producción de abonos orgánicos en la agricultura urbana*. Roma, FAO., 65 pp.
- Porter, W. 1979. The "most probable number" method for enumerating infective propagules of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi in soil. *Aust. J. Soil. Res.* 17: 515-519.
- Qin, S., S. Yeboah., L. Cao., J. Zhang., S. Shi y Y. Liu. 2017. Breaking continuous potato cropping with legumes improves soil microbial communities, enzyme activities and tuber yield. *PLoS one*, 12(5): e0175934.
- Rhoades, J. 1982. Souble salts. En: *Methods of soil analysis, part 2* (A. Page., R. Miller y D. Keeney, Eds.). 2da Ed. Madison, American Society of Agronomy, Inc., p: 167-179.
- Romero, L. y M. Monasterio. 2005. Papas negras, papas de bosque paramero. Un pasivo socioambiental de la modernización agrícola en Los Andes de Venezuela ¿Es posible recuperarlos?. *Bol. Antrop.* 23(64):107-158.
- Sarmiento, L. 2000. Water balance and soil loss under long fallow agriculture in the Venezuelan Andes. *Mt. Res. Dev.* 20(3): 246-253.

- Sarmiento, L. y P. Bottner. 2002. Carbon and nitrogen dynamics in two soils with different fallow times in the high tropical Andes: Indication for fertility restoration. *Appl. Soil. Ecol.* 19(1): 79-89.
- Schmidt, S., Sobieniak, L., Kageyama, S., Halloy, S. y C. Schadt. 2008. Mycorrhizal and dark-septate fungi in plant roots above 4270 meter elevation in the Andes and Rocky mountains. *Arct. Acnt. Alp. Res.* 40(3): 576-583.
- Sieverding, E. 1991. *Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems*. 1era Ed. Eschborn, GT7.Gmbh., 371 pp.
- Tabatabai, M. y J. Bremmer. 1969. Use of p-nitrophenylphosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil. Biol. Biochem.* 1: 301-307.
- Urcelay, C., J. Acho y R. Joffre. 2011. Fungal root symbionts and their relationship with fine root proportion in native plants from the Bolivian Andean highlands above 3700m elevation. *Mycorrhiza* 21: 323-330.
- USDA. 1998. *Soil quality indicators: pH*. 1era Ed. Washington D.C, USDA., 3 pp.
- van Aarle, I., T. Cavagnaro., S. Smith., F. Smith y S. Dickson. 2005. Metabolic activity of *Glomus intraradices* in Arum- and Paris-type arbuscular mycorrhizal colonization. *New. Phytol.* 166(2):611-618.
- Vergara, Y., F., Contreras., A. Zambrano., E. Hernández., G. Bianchi., D. Machado., R. Varela y otros. 2015. Efecto de la gallinaza sobre propiedades químicas y biológicas de un suelo del estado Mérida Venezuela. *Agríc. Andina.* 21: 34-51.
- Villa, P. y L. Sarmiento. 2009. Recomendación alternativa para la fertilización del cultivo de papa en los altos Andes venezolanos. *INIA Hoy.* 6:191-200.