



Cuantificación de la respiración y biomasa microbiana en Andisoles del sur de Colombia

Respiration and microbial biomass quantification in Southern Colombia Andisols

Rosero, J. ^{a*}, Vélez, J. ^a, Burbano, H. ^a, Ordóñez, H. ^a

^aFacultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño, Ciudad Universitaria Torobajo – Calle 18 No. 50-02, Nariño, Colombia.



ARTICLE INFO

Keywords:

Silvopastoral systems
Carbon
Forest
Land uses

Original Research Article,
Special Issue: Sustainable
Management of Volcanic Ash Soils

*Corresponding author:

Jerson Rosero M.

E-mail address:

jroseromoran@gmail.com

ABSTRACT

Soil respiration was evaluated by quantifying CO₂ and carbon from microbial biomass (CBM) in a livestock production system that integrates different land uses, located south-east of the municipality of Pasto. The evaluated uses correspond to secondary forest, prairie and silvopastoral system (Ssp), at two depths (0-10 cm and 10-20 cm). A completely randomised design was used in a 3x2 factorial arrangement (Factor A: uses, Factor B: depths). The soils presented a sandy loam texture, moderately acidic pH, high cation exchange capacity, high organic carbon content, medium calcium, magnesium and potassium content, and low phosphorus content. The classification analysis allowed the formation of three groups that coincided with the three land uses evaluated, where the Ssp presented the highest number of variables above the general average of the study. The Anova showed a p-value <0.001 for the interaction use * depth; Tukey's means comparison tests allowed establishing that the highest respiration values occurred in the forest at a depth of 0-10 cm (1.89 mg⁻¹ CO₂ C g⁻¹ soil⁻¹), while in the Ssp at a 10-20 cm depth the lowest respiration values occurred (0.072 mg⁻¹ CO₂ C g⁻¹ soil⁻¹). The CBM presented higher values in the forest at a depth of 0-10 cm (179.19 μg⁻¹ C g⁻¹ soil⁻¹) and lower values in the Ssp at a depth of 0-10cm (117.72 μg⁻¹ C g⁻¹ soil⁻¹).

RESUMEN

Se evaluó la respiración del suelo mediante la cuantificación de CO₂ y el carbono de la biomasa microbiana (CBM) en un sistema de producción ganadero que integra diferentes usos del suelo, localizado al sur-orientado del municipio de Pasto. Los usos evaluados correspondieron a bosque secundario, pradera y sistema silvopastoril (Ssp), a dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm); se utilizó un diseño completamente al azar en un arreglo factorial 3x2 (Factor A: usos, Factor B: profundidades). Los suelos presentaron una textura franco arenosa, pH moderadamente ácido, alta capacidad de intercambio catiónico, altos contenidos de carbono orgánico, medianos contenidos de calcio, magnesio y potasio, y bajos contenidos de fósforo. El análisis de clasificación permitió la conformación de tres grupos que coincidieron con los tres usos del suelo evaluados, en donde el Ssp presentó el mayor número de variables por encima de la media general del estudio. El Anova demostró un p-valor <0,001 para la interacción uso*profundidad; las pruebas de comparación de medias de Tukey permitieron establecer que los mayores valores de respiración se presentaron en el bosque a una profundidad de 0-10 cm (1,89 mg⁻¹ CO₂ C g⁻¹ suelo⁻¹) mientras que en el Ssp a una profundidad de 10-20 cm ocurrieron los valores más bajos de respiración (0,072 mg⁻¹ CO₂ C g⁻¹ suelo⁻¹). El CBM presentó valores superiores en bosque a una profundidad de 0-10 cm (179,19 μg⁻¹ C g⁻¹ suelo⁻¹) y valores inferiores en el Ssp a una profundidad de 0-10 cm (117,72 μg⁻¹ C g⁻¹ suelo⁻¹).

Palabras claves: sistemas silvopastoriles, carbono, bosque, usos de suelo.

INTRODUCCIÓN

La intensificación de la actividad ganadera ha provocado impactos negativos sobre los bosques, las fuentes hídricas y los suelos (Butt, 2016; Jadán *et al.*, 2017), estos últimos, considerados como los más perjudicados, pues el incremento de la ocupación animal por unidad de área, la transformación paulatina de bosques a pasturas, y el uso de suelos que presentan limitan-

tes para esta actividad han generado desequilibrios y perturbaciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los mismos (Murillo, 2015).

En Colombia, los sistemas de producción ganadera se desarrollan en todo su territorio, en diferentes zonas altitudinales, climas, relieves y ecosistemas, con diversos propósitos como: producción de leche, carne, pieles, lana, entre otros (Viloria de la Hoz, 2015; Montoya, 2015). En el departamento de Nariño los sistemas

de producción ganadera localizados por encima de los 2.400 m s. n. m., se caracterizan por la integración de diferentes usos del suelo, fruto de las múltiples transiciones de bosque a pastura, prevaleciendo entre estos usos aquellos bajo cobertura de bosques secundarios, sistemas silvopastoriles y cultivos heterogéneos de pasturas, los cuales son usados de manera integral en función de las necesidades del productor (Navia *et al.*, 2015, Navia *et al.*, 2017). Esta dinámica productiva tiene efectos sobre los suelos, afectando sus propiedades (Benavides *et al.*, 2015; Marín *et al.*, 2017).

Esta actividad manejada inapropiadamente ha originado problemas de degradación y pérdida de fertilidad de los suelos (Marín *et al.*, 2017; Sotelo *et al.*, 2017). Entre los componentes del suelo afectados por la degradación, se halla el biológico, pues el cambio abrupto de cobertura vegetal (“potrerización”), el pastoreo en fuertes pendientes y el manejo inadecuado de ciclos de pastoreo, alteran propiedades físicas y químicas claves para la existencia de las comunidades microbianas, las cuales son altamente sensibles (Crespo, 2015; Lizarazo y Gómez, 2015; Ruíz, 2017).

Las comunidades microbianas son importantes porque mantienen los flujos de ingreso y salida de la materia orgánica, además de actuar como puerta de entrada de los residuos orgánicos a la solución del suelo (Bowles *et al.*, 2014). Sin éstas, los suelos carecerían de fertilidad *per se*, ya que las comunidades microbianas transforman moléculas orgánicas complejas a formas simples y asimilables por las plantas, lo que da a los suelos su grado de fertilidad (Anriquez *et al.*, 2017; Mamani *et al.*, 2017; Nieto y Litvak, 2017).

La respiración del suelo es la producción total de CO₂ por unidad de área y tiempo (Pardo *et al.*, 2019) resultante de la oxidación química de los compuestos de carbono, mediada por organismos y raíces (Lloyd y Taylor, 1994; Raich y Tufekciogul, 2000; Yi *et al.*, 2007). Esta juega un papel fundamental en diversos fenómenos ecológicos, como el funcionamiento de las plantas y la concentración global del CO₂ atmosférico (Liu *et al.*, 2006; Sánchez, 2016). La regulan factores bióticos y abióticos como: la temperatura, la humedad del suelo, la concentración de nutrientes, la estructura de la vegetación, la actividad fotosintética y el desarrollo fenológico de la planta (Singh y Gupta, 1977; Subke *et al.*, 2006), así como la biomasa de raíces finas y microbiana (Adachi *et al.*, 2006).

Es así que la producción de CO₂ en el suelo se relaciona con muchos tipos de procesos de respiración autotrófica y heterotrófica, es comparable con la respiración de un organismo, pero, en este caso, resulta de la actividad de la diversa composición de microorganismos del suelo que producen CO₂ (Sandor, 2010). La medida del C-CO₂ permite evaluar la actividad total de un suelo, la transformación de un determinado sustrato, o la respuesta a un tratamiento (Sánchez, 2016).

De acuerdo con lo anterior, esta investigación evaluó la actividad microbiana del suelo en una finca ganadera con manejo integral que involucra pradera, bosque secundario y sistema silvopastoril, en la zona altoandina del municipio de Pasto, Nariño, a través de la cuantificación de la respiración y biomasa microbiana.

MATERIAL Y MÉTODOS

Localización, usos del suelo y muestreo

El estudio se desarrolló al Sur-oriente del municipio de Pasto, a una altura de 2.800 m s. n. m., con una temperatura promedio de 12 °C y una precipitación de 703 mm año⁻¹ (IDEAM, 2016), sobre un suelo Pachic melanudands (IGAC, 2004). Geográficamente está ubicado en las coordenadas 1.17104, latitud y -77.30332 longitud (CORPONARIÑO, 2011). Se trabajó en los laboratorios de suelos y fisiología vegetal de la Universidad de Nariño, ubicados en el municipio de Pasto (Nariño) a una altura de 2.527 m s. n. m., y una temperatura media de 11°C, localizados en las coordenadas 1.231838, latitud y -77.293571 longitud (IDEAM, 2019).

La zona de bosque secundario ocupa un área de 5,57 ha, con una edad aproximada de 50 años, tiene especies nativas como chilco (*Joseanthus crassilanatus* (Cuatrec) H. Rob.), amarrillo (*Miconia* sp.), Encino liso (*Weinmannia rollotti* Killip.), Cordoncillo (*Piper* sp.), y Mayo (*Tibouchina mollis* (Bonpl) Cogn.), en diferentes estados sucesionales, también presenta especies introducidas como pino (*Pinus* sp.), acacias (*Acacia decurrens* Willd. y *Acacia melanoxylon* R. Br.) y aliso (*Alnus acuminata* Kunth.). Sobre este uso no se realiza ninguna práctica de extracción y manejo, se destina a la conservación y el propietario propende por su restauración.

Adicionalmente, la zona de pradera abarca un área de 6,97 ha y tiene especies de pastos naturales como el kikuyo (*Cenchrus clandestinus* (Hochst. Ex Chiov.) Morrone) y mejorados como el llantén forrajero (*Plantago major* L.), y mezcla de pastos tetrablend compuesto por ryegrass híbrido tetraploide, ryegrass anual tetraploide, pasto azul orchoro, y trébol rojo gigante. Este uso tiene una edad aproximada de 30 años, en el cual se desarrollan prácticas de manejo agroecológicas como aplicación de biopreparados y organismos eficientes. Los animales de la raza Holstein ingresan a la pradera cada 40 días, bajo una carga animal de entre 1 y 1,2 animales por hectárea.

Finalmente, el sistema silvopastoril (Ssp) ocupa un área de 3,33 ha, con una edad aproximada de 12 años; tiene un arreglo silvopastoril con plantación en línea de árboles Aliso (*Alnus acuminata* Kunt.) y pasto kikuyo (*Cenchrus clandestinus* (Hochst. Ex Chiov.) Morrone). Solo se realiza rotación de pastoreo cada 40 días.

Para el análisis fisicoquímico se tomó una muestra de suelo al inicio de la investigación. Para estudiar la

respiración y biomasa microbiana se tomaron seis muestras de suelo compuestas por uso, a dos profundidades de 0 a 10 cm y de 10 a 20 cm.

Variables evaluadas

Propiedades físicas y químicas del suelo

Las variables químicas y físicas evaluadas fueron: pH (NTC 5264), porcentaje de carbono orgánico (Walkley-Black (colorimétrico) NTC 5403), nitrógeno total (con base en la materia orgánica), fósforo disponible (Bray II y Kurtz), capacidad de intercambio catiónico (acetato de amonio 1N pH 7 NTC 5268), calcio, magnesio y potasio intercambiable (acetato de amonio 1N pH 7), acidez de cambio (extracción KCL 1N) hierro, manganeso, cobre y zinc (extracción DTPA NTC 5526), boro (extracción agua caliente NTC 5404) y azufre (extracción con fosfato monocálcico monohidratado 0,008M - NTC 5402), humedad gravimétrica (mesa de tensión y membrana de presión), textura (Bouyoucos), densidad aparente (método del cilindro), densidad real (picnómetro), estabilidad estructural (Yoder, 1936), distribución de agregados (Test Sieve Shaker), las cuales se realizaron en los laboratorios especializados de suelos de la Universidad de Nariño.

Respiración del suelo

Siguiendo la metodología recomendada por Burbano (1989), se pesaron 10 g de suelo previamente tamizados a 2 mm, y se introdujeron en tubos de ensayo de 25 ml. Los suelos se encontraban con una humedad promedio del 50% y se adicionó de 3 a 5 ml de agua hasta llegar a capacidad de campo.

En el vial que va en cada tubo de ensayo, se depositaron 0,2 g de BaO_2 y 2 gotas de $Ba(OH)_2$, se agitó el vial para que los compuestos se adhieran uniformemente a las paredes de este. Se depositó el vial sobre el suelo que se encuentra en el tubo de ensayo y se procedió a taponarlo. El suelo se incubó a temperatura ambiente (entre 12 °C y 15 °C)

Medida de CO_2

Se determinó el CO_2 al concluir cada uno de los cuatro periodos de incubación (7 días). Se retiró el vial del tubo de ensayo y se lo colocó en el frasco del calcímetro junto con un tubo plástico que contenía 5 ml de HCl 2N. Se enrasó a cero la columna del calcímetro, con todas las llaves cerradas. El frasco del calcímetro se agitó, para poner en contacto el vial donde se forma $BaCO_3$ y el HCl, para conseguir el desprendimiento del CO_2 . Se leyeron los milímetros que el líquido desplazó en la columna del calcímetro por la presión del CO_2 desprendido. Luego se multiplicó los milímetros de la lectura

por el factor de conversión para las condiciones del calcímetro y del laboratorio, para expresar los resultados en términos de $mg^{-1} CO_2 C g^{-1} suelo^{-1}$.

Cuantificación de la biomasa microbiana

La biomasa microbiana se determinó con el método de fumigación extracción propuesto por Vance *et al.* (1987), para lo cual se pesaron 10 g de suelo (control) en un erlenmeyer de 250 ml, se adicionó 50 ml de K_2SO_4 (0,5M), se agitó 30 min y se filtró con papel Whatman 42. Se procedió a guardar el extracto a 4 °C hasta su procesamiento. Además, se pesaron 10 g de suelo (fumigado con cloroformo libre de etanol) en un beaker de 40 ml, se incubó por 24 h a 25 °C y se procedió igual que en la muestra control.

Del extracto obtenido se colocaron 8 ml en tubos de digestión (3 repeticiones control y 3 fumigado), se adicionó 2 ml de $K_2Cr_2O_7$ (66,7 mM), 70 mg de HgO y 15 ml de mezcla ácida (2 volúmenes de H_2SO_4 (98%) y 1 volumen de H_3PO_4 88%). Las muestras se digirieron a 150 °C por 30 minutos y se dejaron enfriar. Se transfirió a un erlenmeyer de 250 ml, se adicionó 80 ml de agua destilada, se agregó 3 gotas de fenontralina y se valoró el exceso de $K_2Cr_2O_7$ con sal de Morh 33,3 mM $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar (DCA) en arreglo factorial 3x2 con seis repeticiones, donde el factor A correspondió a usos de suelo (bosque secundario, sistema silvopastoril (Ssp) y pradera) y el factor B a profundidad de muestreo (10 cm y 20 cm).

Modelo estadístico

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

En donde:

μ : es el efecto de la media global

α_i : es el efecto incremental sobre la media causado por el nivel i del factor A

β_j : es el efecto incremental sobre la media causado por el nivel j del factor B

$(\alpha\beta)_{ij}$: es el efecto incremental sobre la media causado por la interacción del nivel i del factor A y del nivel j del factor B.

ϵ_{ijk} : es el error experimental asociado al efecto de cada factor

Análisis estadístico

Los resultados se sometieron a una prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, posteriormente se normalizó la base de datos y se sometió a un análisis de varianza y análisis de componentes principales (ACP),

para describir las tendencias de los tratamientos, luego se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de confianza del 95% para determinar el tratamiento con mayor y menor actividad microbiana. Los programas estadísticos utilizados fueron, InfoStat y Spad 5.6, en los cuales se generaron distintas programaciones para los diferentes análisis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características físicas y químicas de los suelos evaluados

Se encontró un primer factor que permite explicar el 48,48% de la variabilidad y está conformado princi-

palmente por las variables: capacidad de intercambio catiónico (CIC) con una correlación variable factor de 0,97; calcio intercambiable 0,86; aluminio intercambiable 0,92; boro (B) 0,96; humedad de saturación 0,99; capacidad de campo 0,94 y punto de marchitez permanente 0,96 (Figura 1); variables que están relacionadas directamente con la dinámica de la materia orgánica y los procesos de humificación, los cuales a su vez están mediados por la actividad microbiana y enzimática del suelo (Gianfreda y Ruggiero, 2006; García *et al.*, 2016).

El segundo factor explica el 21,69% de la variabilidad total, y lo conforman variables relacionadas con: CO₂, magnesio intercambiable, potasio intercambiable, manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), con valores de correlación variable factor, del orden de 0,61; 0,53;

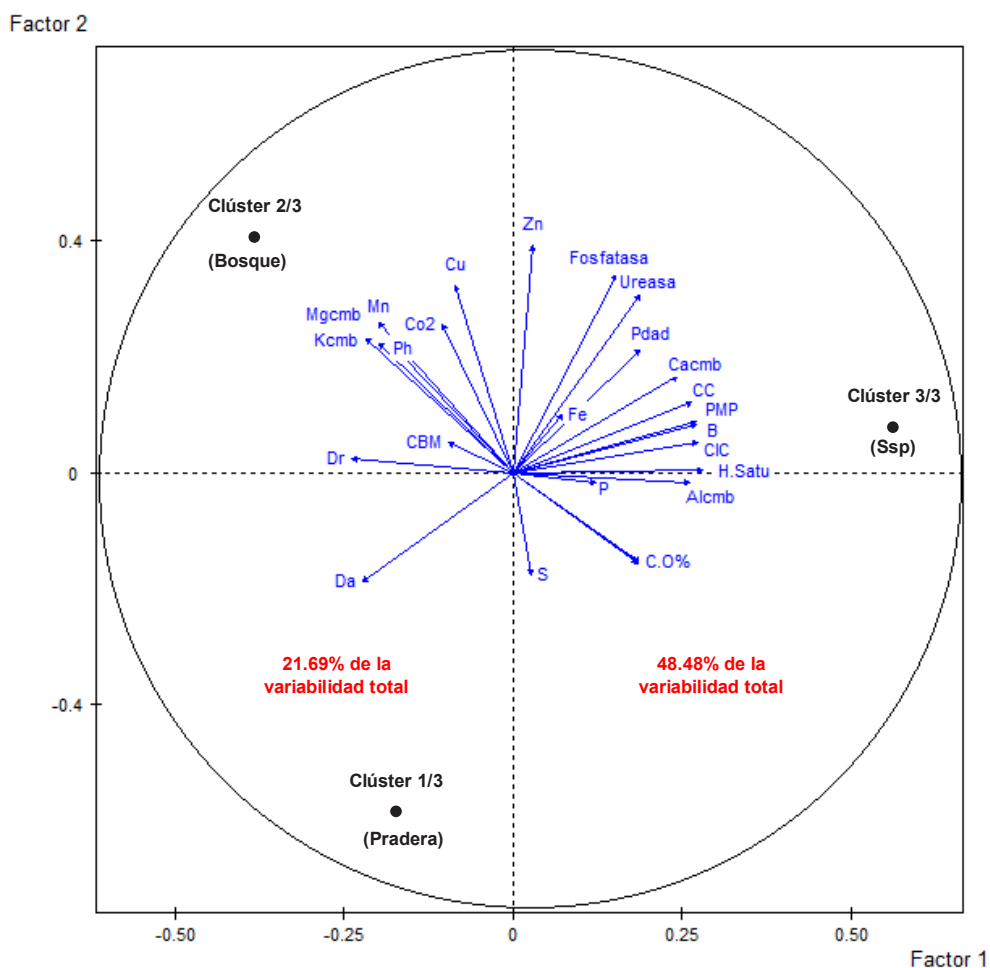


Figura 1. Diagrama del aporte de las variables físico-químicas y biológicas evaluadas, a los dos primeros componentes o factores principales. La línea punteada horizontal divide los dos factores que explicaron el 70,71% de la variabilidad del fenómeno. Los vectores en color azul, demuestran de manera directamente proporcional a su longitud el aporte en porcentaje de cada variable a los dos factores. Los usos del suelo evaluados se localizaron de acuerdo con la proximidad a cada variable.

Figure 1. Diagram of the contribution of the physical-chemical and biological variables evaluated, to the first two components or main factors. The horizontal dotted line divides the two factors that explained 70.71% of the variability of the phenomenon. The vectors in blue color demonstrate, in a directly proportional way to their length, the contribution in percentage of each variable to both factors. The evaluated land uses were located according to the proximity to each variable.

0,55; 0,61; 0,77 y 0,93 respectivamente (Figura 1). Este factor permite observar la relación existente entre los macro y micro nutrientes del suelo y la actividad microbiana. Al respecto, Sánchez *et al.* (2005), destacan la importancia de micro-elementos como Cu, Mn, Zn, Fe, sobre la actividad microbiana. Por su parte, Song *et al.* (2018), encontraron altas correlaciones entre los contenidos de N, P, K, y la actividad microbiana.

El análisis de clasificación permitió agrupar los suelos evaluados en tres grandes grupos en función de la actividad microbiana, los cuales se caracterizan por su afinidad intragrupal y por sus diferencias intergrupales, y a su vez, coincidieron con los usos del suelo evaluados (Figura 2).

El primer grupo, correspondiente al uso pradera, la actividad microbiana representada por las variables (CO_2 , CBM) presentó los valores más bajos con respecto a los otros dos usos evaluados (Bosque y Ssp). Este comportamiento podría estar relacionado con la escasa diversidad en la estructura vegetal, en donde predominan solo pastos como: (*Cenchrus clandestinus* (Hochst. Ex Chiov.) Morrone) *Plantago major* L.), y mezcla de pastos tetrablend compuesto por ryegrass híbrido tetraploide, ryegrass anual tetraploide, pasto azul orchoro, y trébol rojo gigante. Al respecto, Sarto *et al.* (2019), en su estudio relacionado con la actividad microbiana del suelo en un sistema tropical integrado por cultivos y ganadería, afirman que la actividad microbiana y la biomasa microbiana fueron significativamente mayores en un bosque nativo que en una pradera, esto debido a que en áreas sometidas a monocultivo no se producen cantidades considerables de tejidos difíciles de degradar, por lo tanto estas áreas acumulan menos carbono en el suelo y sostienen menos diversidad microbiana (D'Acunto *et al.*, 2016).

En el segundo grupo, que perteneció al uso bosque secundario, presentó valores de CO_2 y CBM por encima de la media general de la evaluación, resultados que

se relacionan con la diversidad existente en la composición vegetal del bosque en evaluación (Tian *et al.*, 2015). Al existir diferentes especies arbustivas y arbóreas, en diferentes estados de sucesión, hay incorporación de material vegetal de diferente calidad en cortos periodos de tiempo, lo que influye positivamente en la estructura y función de la comunidad microbiana (Schimel, 2016) y en consecuencia se altera el metabolismo microbiano del suelo y el flujo de energía (Bardgett y Van der Putten, 2014; Xu *et al.*, 2014).

La influencia del pH del suelo en este grupo concuerda con la relación pH-respiración microbiana; el pH del suelo cercano a 7,0 es el adecuado para la respiración microbiana (Kooch *et al.*, 2017). Al respecto, Bååth y Anderson (2003), informaron que el pH correlacionó positivamente con la respiración del suelo en un bosque de roble y Wallenstein *et al.* (2006), sugirieron que el pH y los cambios asociados a este, pueden ser factores importantes que controlan las comunidades microbianas del suelo (Wang *et al.*, 2008).

Por otra parte, se logra observar valores de elementos menores como Cu, Mn, Zn, por encima del promedio general de la evaluación. Este fenómeno está relacionado con la descomposición de la materia orgánica, porque durante el proceso de transformación de las moléculas orgánicas por los microorganismos del suelo se liberan elementos menores a la solución del mismo (Bastida *et al.*, 2008). Al respecto Gangloff *et al.* (2016) afirman que el aumento en las concentraciones de elementos menores como el Mn y el Zn se encuentran relacionadas con las transformaciones microbianas del carbono orgánico realizadas para acceder al N necesario para formar NO_3^- o NO_2^- como aceptor final de electrones en el proceso de respiración. Por otra parte los altos contenidos de Cu podrían aumentar significativamente la concentración de compuestos fenólicos, los cuales estimulan directamente la actividad microbiana (Brockett *et al.*, 2012; Hättenschwiler y Vitousek, 2000).

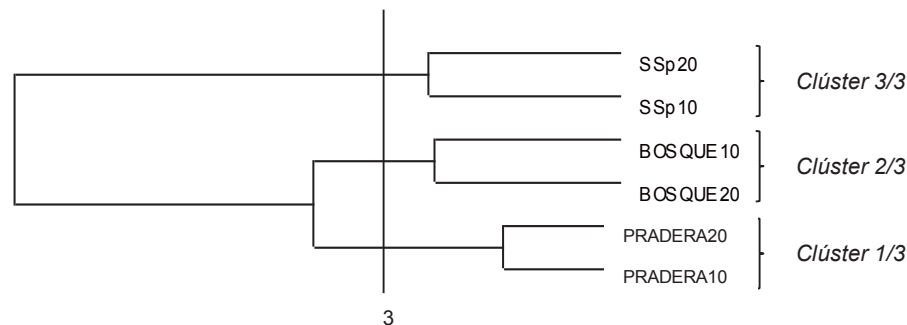


Figura 2. Dendrograma de conformación de grupos basado en un análisis jerárquico de las variables físico-químicas y biológicas evaluadas. Los usos evaluados se caracterizaron por su alta afinidad intragrupal, generando tres clusters o grupos.

Figure 2. Dendrogram representing the group's formation based on the physico-chemical and biological variables evaluated through a hierarchical analysis. The uses evaluated were characterised by their high intragroup affinity, generating three clusters or groups.

En el tercer grupo que coincidió con el sistema silvopastoril (Ssp), el contenido elevado de N del suelo, probablemente se deba a la fijación biológica de N realizada por los árboles de aliso ($1,6 \text{ kg}^{-1} \text{ N árbol año}$) (Hibbs y Cromack, 1990; Muñoz y Pupiales, 2010). Por otra parte, los altos contenidos de carbono orgánico (7,85% - 9,04%) podrían relacionarse con la lenta descomposición de la materia orgánica, influenciada entre otros por la alta acidez encontrada en este uso (pH 4,32 - 5,32), según los criterios de Kooch *et al.* (2017).

Los altos contenidos de Ca, B y Zn encontrados, podrían relacionarse con los altos valores de carbono orgánico del suelo anteriormente mencionados. Respecto a la alta porosidad total presente en este uso (71,92% - 72,70%) Meza y Geissert, (2003) encontraron que las variaciones en la porosidad total del suelo se encuentran estrechamente correlacionadas con los contenidos de carbono orgánico total.

Carbono de biomasa microbiana (CBM) y respiración del suelo medida a través de CO_2

El análisis de varianza para respiración CO_2 y CBM, detectó diferencias altamente significativas ($p < 0,001$) para la interacción uso-profundidad.

Los valores de respiración difirieron estadísticamente entre el bosque a una profundidad de 0-10 cm ($1,89 \text{ mg}^{-1} \text{ CO}_2 \text{ C g}^{-1} \text{ suelo}^{-1}$), frente a los demás usos del

suelo evaluados, presentándose el promedio más bajo de respiración en el Ssp a una profundidad de 10-20 cm ($0,072 \text{ mg}^{-1} \text{ CO}_2 \text{ C g}^{-1} \text{ suelo}^{-1}$) (Figura 3).

Estos valores podrían relacionarse, entre otros factores, con los aportes de biomasa aérea y subterránea realizados por la diversa vegetación presente en el bosque (Finér *et al.*, 2011; Ríos *et al.*, 2017; Parsapour *et al.*, 2018), biomasa que inicialmente se acumula en los primeros 10 cm del suelo (Pérez-Cruzado *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2017). Adicionalmente, Davidson *et al.* (2002), afirman que el aumento en la respiración del suelo en bosques de más de 25 años se podría explicar por una mayor biomasa de raíces finas en el suelo.

El contenido de nutrientes del suelo actúa como un factor principal que controla la variabilidad en la respiración microbiana del suelo bajo diferentes usos y coberturas (Tardy *et al.*, 2014; Mganga *et al.*, 2016). La alta respiración del suelo en el bosque puede explicarse con el aumento en el contenido de K, Mn, Mg, Cu, Zn, situación que también está relacionada con la producción de raíces finas (Metcalf *et al.*, 2008), lo cual supone un posible cambio en la dinámica del carbono subterráneo (Metcalf *et al.*, 2008; Finér *et al.*, 2011; Quinto *et al.*, 2016) que estimula la actividad microbiana, y conduce a un aumento en la respiración del suelo (Yan *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2019).

Los promedios más bajos de respiración ($0,072 \text{ mg}^{-1} \text{ CO}_2 \text{ C g}^{-1} \text{ suelo}^{-1}$) ocurrieron en el sistema silvopastoril

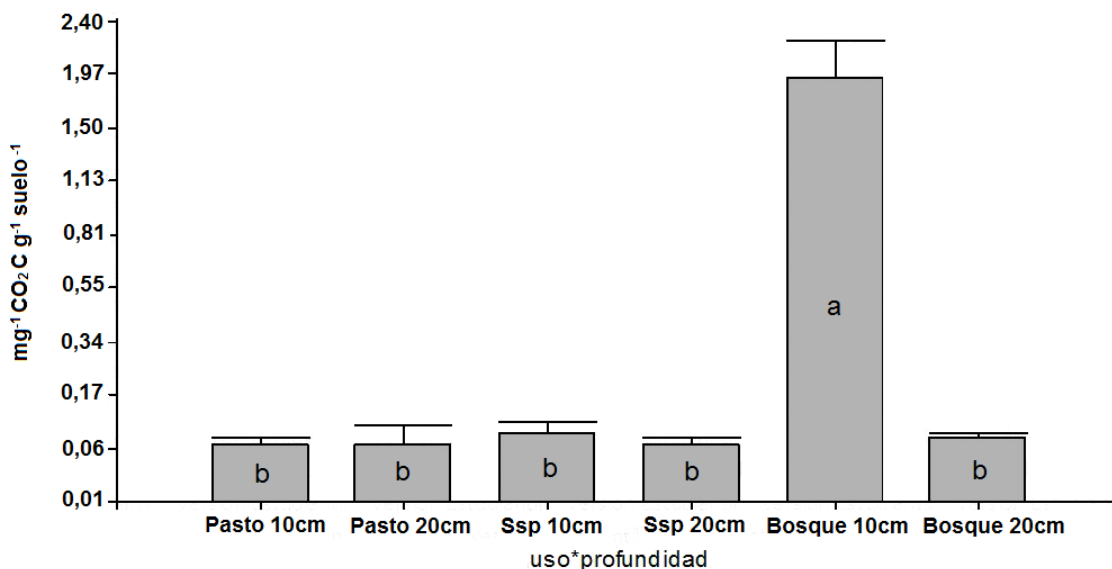


Figura 3. Prueba de comparación de medias de Tukey para respiración (CO_2), medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). Ssp 10: muestra tomada en el Sistema silvopastoril a una profundidad de 10 cm; Ssp 20 cm: muestra tomada en el Sistema silvopastoril a una profundidad de 20 cm. Se colectaron un total de 6 repeticiones por profundidad.

Figure 3. Tukey's comparison test for respiration (CO_2), averages with the same letter do not show significant differences ($p > 0.05$). Ssp 10: sample taken in the silvopastoral system at 10 cm depth; Ssp 20 cm: sample taken in the silvopastoral system at 20 cm depth. A total of 6 replicates per depth were collected.

(Ssp) a una profundidad de 10-20 cm. Esta situación puede explicarse en razón de los altos valores de N (0,66%) encontrados entre los 10-20 cm de profundidad, en comparación con los otros usos evaluados (Mo *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2009). Este fenómeno puede explicarse debido a que altos contenidos de N pueden estabilizar la materia orgánica y mejorar su resistencia a la descomposición microbiana al incorporar parte de este N a la materia orgánica, formando algunos compuestos recalcitrantes, como los indoles y los pirrol (Riggs *et al.*, 2015; Yong *et al.*, 2019), aseveración que resulta consistente con los resultados de esta investigación, pues los porcentajes de materia orgánica más altos de la evaluación se encontraron en este uso con 21,3%. Por otra parte Peng *et al.* (2017) encontraron que como resultado del proceso de nitrificación, se pueden acumular más protones (H^+) en el suelo lo que conduce a una disminución del pH y en consecuencia una disminución de la actividad microbiana, situación que se relaciona con el valor de pH (4,32) encontrado en este uso, el cual a su vez es el valor más bajo de la evaluación.

Carbono de la Biomasa Microbiana (CBM)

A 10 cm de profundidad el CBM fue mayor ($p < 0,001$) en el bosque ($179,19 \mu g^{-1} C g^{-1} \text{ suelo}^{-1}$) con respecto al Ssp ($117,72 \mu g^{-1} C g^{-1} \text{ suelo}^{-1}$) (Figura 4).

Los altos contenidos de CBM encontrados en el bosque a una profundidad de 0-10 cm, se hallan dentro de los rangos reportados por Arunachalam y Arunachalam (2000) para bosques subtropicales ($978 \mu g^{-1} C g^{-1} \text{ suelo}^{-1}$ a $2.088 \mu g^{-1} C g^{-1} \text{ suelo}^{-1}$) y por Ravindran y Yang (2015) para suelos de bosque de montaña subalpino ($140 \mu g^{-1} C g^{-1} \text{ suelo}^{-1}$ a $1.320 \mu g^{-1} C g^{-1} \text{ suelo}^{-1}$). Este comportamiento podría ser explicado principalmente por la diversa composición florística en diferentes estados sucesionales, situación que está relacionada con la cantidad y calidad de la materia orgánica depositada en la parte superficial del suelo proveniente de biomasa aérea y subterránea de la vegetación existente (Bardgett y Van der Putten, 2014; Xu *et al.*, 2014; Schimel, 2016).

Varias investigaciones explican los efectos del tipo de vegetación sobre la biomasa microbiana en los suelos (Hackl *et al.*, 2004; Yousuf *et al.*, 2012; Zhu *et al.*, 2012; Thomson *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2016; Xiao *et al.*, 2019; Yong *et al.*, 2019) y cómo estas influyen sobre las diferencias en la cantidad y calidad de los aportes a través de distintos tipos de hojarasca, raíces y la especificidad de nutrientes asociada, que pueden influir en la biomasa microbiana del suelo (Feng *et al.*, 2009; Jin *et al.*, 2010).

Respecto a los bajos contenidos de CBM del estudio encontrados en el Ssp a una profundidad de 0-10cm ($117,72 \mu g^{-1} C g^{-1} \text{ suelo}^{-1}$), podrían estar relacionados

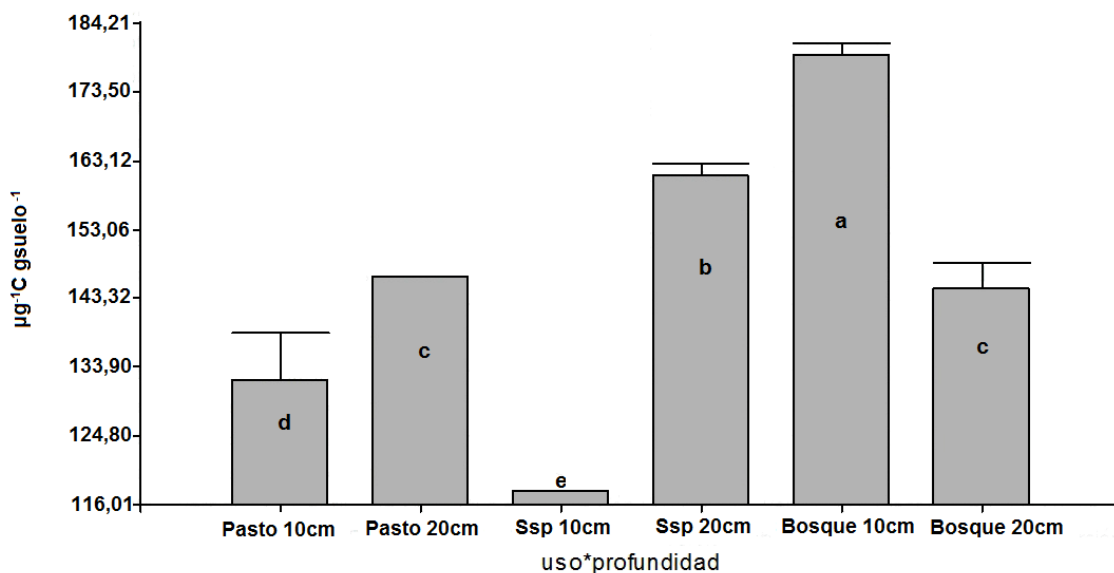


Figura 4. Prueba de comparación de medias de Tukey para carbono de la biomasa microbiana (CBM), medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). Ssp 10: muestra tomada en el Sistema silvopastoral a una profundidad de 10 cm. Ssp 20 cm: muestra tomada en el Sistema silvopastoral a una profundidad de 20 cm. Se colectaron un total de 6 repeticiones por profundidad.

Figure 4. Tukey's comparison test for microbial biomass carbon (MBC), averages with the same letter do not show significant differences ($p > 0.05$). Ssp 10: sample taken in the silvopastoral system at a depth of 10 cm. Ssp 20 cm: sample taken in the silvopastoral system at a depth of 20 cm. A total of 6 replicates per depth were collected.

con los altos contenidos de N encontrados (0,66% frente a 0,46% de la media genera de este estudio). Trabajos previos en bosques tropicales sugirieron que altos contenidos de N del suelo podrían disminuir la biomasa microbiana y cambiar la composición de la comunidad microbiana (Treseder, 2008; Liu y Greaver, 2010).

CONCLUSIONES

En los andisoles de la zona alto-andina bajo monocultivos de pastura y prácticas de pastoreo continuo disminuyen los valores de carbono en la biomasa microbiana respecto a suelos bajo bosques, en donde la diversa composición vegetal produce mayores cantidades de biomasa difícil de degradar.

Los valores altos de CO₂ y CBM se encuentran estrechamente relacionados con la diversidad y diferentes estados sucesionales de la estructura vegetal presente en el bosque.

Las comunidades microbianas en andisoles de la zona alto-andina están influenciadas por carbono orgánico, humedad, disponibilidad de N, P y pH, las que a su vez determinan la capacidad productiva del suelo.

Los sistemas silvopastoriles dominados por especies fijadoras de nitrógeno como el aliso (*Alnus acuminata* Kunth.) pueden disminuir la respiración y biomasa microbiana debido a incrementos en el nitrógeno del suelo fijado por estas especies, por lo tanto se sugiere incorporar diferentes especies en estos sistemas.

Los resultados sugieren que la diversidad vegetal tiene implicaciones positivas sobre la actividad microbiana del suelo, razón por la cual, la diversificación de especies vegetales en los sistemas silvopastoriles, además de la conservación de suelos, conllevaría beneficios sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los mismos.

REFERENCIAS

Adachi, M., Bekku Y., Rashidah W., Okuda T., Koizumi H., 2006. Differences in soil respiration between tropical ecosystems. *Applied Soil Ecology* 34, 258–265.

Anriquez, A., Barreto, G., Silberman, J., Domínguez, N., Nuñez, J.D., 2017. Abundancia y actividad microbiana del suelo en sistemas silvopastoriles de la región chaqueña. *Agrotecnia* (25), 54.

Arunachalam, A., Arunachalam, K., 2000. Influence of gap size and soil properties on microbial biomass in a subtropical humid forest of north-east India. *Plant and Soil* 223 (1-2), 187–195.

Bååth, E., Anderson, T.H., 2003. Comparison of soil fungal/bacterial ratios in a pH gradient using physiological and PLFA-based techniques. *Soil Biology and Biochemistry* 35 (7), 955–963.

Bardgett, R., Van der Putten, W., 2014. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature* 515 (7528), 505.

Bastida, F.A., Zsolnay A., Hernández T., García C., 2008. Past,

present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147, 159–171.

Benavides, E., Morales, L., Navia, J., 2015. Propiedades físicas y contenido de materia orgánica en diferentes usos del suelo en Samaniego, Colombia. *Revista Agroforestería Neotropical* 1 (5), 27–41.

Berg, B., 2000. Descomposición de la hojarasca y rotación de la materia orgánica en suelos forestales del norte. *Ecología y Manejo Forestal* 133 (1-2), 13–22.

Bowles, T., Acosta-Martínez, V., Calderón, F., Jackson, L., 2014. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape. *Soil Biology and Biochemistry* 68, 252–262.

Brockett, B., Prescott, C., Grayston, S., 2012. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada. *Soil Biology and Biochemistry* 44 (1), 9–20.

Burbano, H., 1989. El Suelo una visión sobre sus componentes biogénicos. Pasto, Universidad de Nariño. Primera Edición, Pasto, Colombia.

Butt, B., 2016. Ecology, mobility and labour: Dynamic pastoral herd management in an uncertain world. *Revue Scientifique et Technique* 35, 461–472.

Corporación Autónoma de Nariño (CORPONARIÑO), 2011. Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico Quebrada Miraflores, <http://corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhmirafloresp1.pdf>

Crespo, G., 2015. Factores que influyen en el reciclaje de nutrientes en pastizales permanentes, avances en el desarrollo de su modelación. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 49 (1), 1–10.

D'Acunto, L., Semmartin, M., Ghersa, C., 2016. Uncultivated margins are source of soil microbial diversity in an agricultural landscape. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 220, 1–7.

Davidson, E., Savage, K., Bolstad, P., Clark, D., Curtis, P., Ellsworth, D., Randolph, J.C., 2002. Belowground carbon allocation in forests estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 113 (1), 39–51.

Feng, W., Zou, X., Schaefer, D., 2009. Above-and belowground carbon inputs affect seasonal variations of soil microbial biomass in a subtropical monsoon forest of southwest China. *Soil Biology and Biochemistry* 41 (5), 978–983.

Finér, L., Ohashi, M., Noguchi, K., Hirano, Y., 2011. Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. *Forest Ecology and Management* 262 (11), 2008–2023.

Gangloff, S., Stille, P., Schmitt, A., Chabaux, F., 2016. Factors controlling the chemical composition of colloidal and dissolved fractions in soil solutions and the mobility of trace elements in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 189, 37–57.

García, G., Torres, M., Rebellon, L., 2016. Evaluación de la adecuación de humedad en el compostaje de biorresiduos de origen municipal en la Planta de Manejo de Residuos Sólidos (PMRS) del Municipio de Versalles, Valle del Cauca. *Gestión y Ambiente* 19 (1), 179–191.

Gianfreda, L., Ruggiero P., 2006. Enzyme Activities in Soil, in:

- Nannipieri P., Smalla K. (Eds.), *Nucleic Acids and Proteins in Soil*. Soil Biology, vol 8. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 257–311.
- Hackl, E., Bachmann, G., Zechmeister-Boltenstern, S., 2004. Microbial nitrogen turnover in soils under different types of natural forest. *Forest Ecology and Management* 188 (1-3), 101–112.
- Hättenschwiler, S., Vitousek, P., 2000. The role of polyphenols in terrestrial ecosystem nutrient cycling. *Trends in Ecology and Evolution* 15 (6), 238–243.
- Hibbs, D., Cromack, K., 1990. Actinorhizal plants in Pacific Northwest forests, in: Schwintzer, C., Tjepkema, J. (Eds.), *The biology of Frankia and actinorhizal plants*, Academic Press, San Diego, pp. 343–363.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), 2016. Monitoreo de la deforestación en 2015. Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono SMBYC. http://www.ideam.gov.co/web/sala-deprensa/noticias//asset_publisher/96oXgZAhHrhJ/content/lacifradedeforestacion-en-colombia-2015-reporta-124-035-hectareas-afectada
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), 2019. Información básica de estación-Catálogo Nacional de Estaciones. <http://visor.ideam.gov.co:8530/geovisor/#!/profiles/3>.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2004. Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Nariño. Edición N° 2. Bogotá, Colombia.
- Jadán, O., Cedillo, H., Zea, P., Quichimbo, P., Peralta, Á., Vaca, C., 2017. Relación entre deforestación y variables topográficas en un contexto agrícola ganadero, cantón Cuenca. *Bosques Latitud Cero* 6 (2), 1–43.
- Jin, H., Sun, O.J., Liu, J., 2010. Changes in soil microbial biomass and community structure with addition of contrasting types of plant litter in a semiarid grassland ecosystem. *Journal of Plant Ecology* 3 (3), 209–217.
- Kooch, Y., Samadzadeh, B., Hosseini, S.M., 2017. The effects of broad-leaved tree species on litter quality and soil properties in a plain forest stand. *Catena* 150, 223–229.
- Liu, H., Li, L., Han, X., Huang, J., Sun, J., Wang, H., 2006. Respiratory substrate availability plays a crucial role in the response of soil respiration to environmental factors. *Applied Soil Ecology* 32, 284–292.
- Liu, J., Mei, L., Gu, J., Quan, X., Wang, Z., 2009. Effects of nitrogen fertilization on fine root biomass and morphology of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii*: a study with in-growth core approach. *Chinese Journal of Ecology* 28 (1), 1–6.
- Liu, L., Greaver, T., 2010. A global perspective on belowground carbon dynamics under nitrogen enrichment. *Ecology Letters* 13 (7), 819–828.
- Lizarazo, P., Gómez, D., 2015. Microbiota rizosférica de *Espeletia* spp. de los Páramos de Santa Inés y de Frontino-Urrao en Antioquia, Colombia. *Acta Biológica Colombiana* 20 (1), 175–182.
- Lloyd, J., Taylor, A., 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology* 8, 315–323.
- Mamani, A., Casas, R., Sánchez, H., Mamani, J., 2017. Nitrógeno mineral y actividad microbiana en suelos del Altiplano Central boliviano. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales* 1 (1), 65–72.
- Marín, M., Pescador, L., Ramos, L., Charry, J., 2017. Impacto de la actividad ganadera sobre el suelo en Colombia. *Ingeniería y Región* 17, 1–12.
- Metcalf, D., Meir, P., Aragão, L., Costa, A., Braga, A., Gonçalves, P., Athaydes, J., Almeida, S., Dawson, L., Malhi, Y., Williams, M., 2008. The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest. *Plant and Soil* 311, 188–199.
- Meza, E., Geissert, D., 2003. Estructura, agregación y porosidad en suelos forestales y cultivados de origen volcánico del Cofre De Perote, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 5 (2), 57–61.
- Mganga, K., Razavi, B., Kuzyakov, Y., 2016. Land use affects soil biochemical properties in Mt. Kilimanjaro region. *Catena* 141, 22–29.
- Mo, J., Zhang, W., Zhu, W., Gundersen, P., Fang, Y., Li, D., Wang, H., 2008. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. *Global Change Biology* 14 (2), 403–412.
- Montoya, G., 2015. Diagnóstico de la ganadería Reynolds ubicada en Wisconsin, Estados Unidos. Tesis pregrado en Administración de empresas. Corporación Universitaria Lasallista. 56 p.
- Muñoz, J., Pupiales, S., 2010. Evaluación del estado actual del nitrógeno en un arreglo silvopastoril alis (*Alnus jorullensis* H B y K) kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov.) en el altiplano de Pasto. *Revista de Ciencias Agrícolas* 28 (1), 161–175.
- Murillo, M., 2015. Tomadores de decisión en sistemas ganaderos de la cuenca alta del río Guarinó (Caldas, Colombia): percepción de problemas ambientales y prácticas de conservación del agua. *Luna Azul* (33), 97–109.
- Navia, J., Muñoz, D., Solarte, J., 2015. Caracterización biofísica y socioeconómica de fincas ganaderas de leche en el municipio de Guachucal, Nariño. *Temas Agrarios* 20 (1), 113–129.
- Navia, J., Muñoz, D., Solarte, J., 2017. Caracterización del componente arbóreo de cercas vivas en sistemas agroforestales en el departamento de Nariño. *Temas Agrarios*, 22 (2), 80–89.
- Nieto, N., Litvak, V., 2017. Caracterización preliminar de la actividad microbiana solubilizadora de fosfato del biofertilizante Tierra Nueva. Tesis licenciatura en Biotecnología. Universidad ORT Uruguay. 143 p.
- Pardo, Y., Gómez, P., Cantero, E., 2019. Biomasa microbiana y respiración basal del suelo bajo sistemas agroforestales con cultivos de café. *Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica* 22 (1), 1144–1144.
- Parsapour, M., Kooch, Y., Hosseini, S., Alavi, S., 2018. Litter and topsoil in *Alnus subcordata* plantation on former degraded natural forest land: A synthesis of age-sequence. *Soil & Tillage Research* 179, 1–10.
- Peng, Y., Chen, G., Chen, G., Li, S., Peng, T., Qiu, X., Xu, Z., 2017. Soil biochemical responses to nitrogen addition in a secondary evergreen broad-leaved forest ecosystem. *Scientific Reports* 7 (1), 2783.
- Pérez-Cruzado, C., Sande, B., Omil, B., Rovira, P., Martín-Pastor, M., Barros, N., Merino, A., 2014. Organic matter properties in soils afforested with *Pinus radiata*. *Plant and Soil* 374 (1-2), 381–398.
- Quinto, H., Caicedo, H., Pérez, M., Moreno, F., 2016. Dinámica

- de raíces finas y su relación con la fertilidad edáfica en bosques pluviales tropicales del Chocó biogeográfico colombiano. *Revista de Biología Tropical* 64 (4), 1709–1719.
- Raich, J., Tufekciogul, A., 2000. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry* 48 (1), 71–90.
- Ravindran, A., Yang, S., 2015. Effects of vegetation type on microbial biomass carbon and nitrogen in subalpine mountain forest soils. *Journal of Microbiology, Immunology and Infection* 48 (4), 362–369.
- Riggs, C., Hobbie, S., Bach, E., Hofmockel, K., Kazanski, C., 2015. Nitrogen addition changes grassland soil organic matter decomposition. *Biogeochemistry* 125 (2), 203–219.
- Ríos, M., Dager, M., Carrero, J., Tovar, M., 2017. Fraccionamiento químico de la materia orgánica en suelos de bosque y sabana. *Revista Multiciencias* 16 (1), 14–21.
- Ruíz, O., 2017. Prácticas agropecuarias coloniales y degradación del suelo en el Valle de Saquencipá, Provincia de Tunja, siglos XVI y XVII. Tesis Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. 95 p.
- Sánchez, B., Ruíz, M., Ríos, M., 2005. Materia orgánica y actividad biológica del suelo en relación con la altitud, en la cuenca del río Maracay, estado Aragua. *Agronomía Tropical*, 55 (4), 507–534.
- Sánchez, V., 2016. Dinámica del carbono orgánico en suelos de sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca. Tesis Magister en Agroforestería Tropical. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A. Bogotá, Colombia. 100 p.
- Sandor, M., 2010. Soil Respiration: Concept and Measurement Methods. *ProEnvironment* 3, 54–57.
- Sarto, M., Borges, W., Sarto, J.R., Pires, C., Rice, C., Rosolem, C., 2019. Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. *Applied Soil Ecology* 145, 2–11.
- Schimel, J., 2016. Ecología microbiana: vincular ómicas a biogeoquímica. *Microbiología de la naturaleza* 1 (2), 15–28.
- Singh, J., Gupta, S., 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The botanical review* 43 (4), 449–528.
- Song, D., Tang, J., Xi, X., Zhang, S., Liang, G., Zhou, W., Wang, X., 2018. Responses of soil nutrients and microbial activities to additions of maize straw biochar and chemical fertilization in a calcareous soil. *European Journal of Soil Biology* 84, 1–10.
- Sotelo, M., Suárez, J., Álvarez, F., Castro, A., Calderón, V., Arango, J., 2017. Sistemas sostenibles de producción ganadera en el contexto amazónico Sistemas silvopastoriles: ¿una opción viable?. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Publicación CIAT No. 448, Cali, Colombia.
- Subke, J., Inghima, I., Cotrufo, M., 2006. Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: a meta-analytical review. *Global Change Biology* 12, 921–943.
- Tardy, V., Mathieu, O., Lévêque, J., Terrat, S., Chabbi, A., Lemancaeu, P., Maron, P., 2014. Stability of soil microbial structure and activity depends on microbial diversity. *Environmental Microbiology Reports* 6 (2), 173–183.
- Thomson, B., Tisserant, E., Plassart, P., Uroz, S., Griffiths, R., Hannula, S., Martin, F., 2015. Soil conditions and land use intensification effects on soil microbial communities across a range of European field sites. *Soil Biology and Biochemistry* 88, 403–413.
- Tian, J., McCormack, L., Wang, J., Guo, D., Wang, Q., Zhang, X., Kuzyakov, Y., 2015. Linkages between the soil organic matter fractions and the microbial metabolic functional diversity within a broad-leaved Korean pine forest. *European Journal of Soil Biology* 66, 57–64.
- Treseder, K., 2008. Nitrogen additions and microbial biomass: A meta-analysis of ecosystem studies. *Ecology Letters* 11 (10), 1111–1120.
- Vance, E., Brookes, P., Jenkinson, D., 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry* 19 (6), 703–707.
- Viloria de la Hoz, J., 2015. La ganadería bovina en las llanuras del Caribe Colombiano. Documentos de Trabajo sobre economía regional. Banco de la República de Colombia. Publicación N° 40. Cartagena de Indias, Colombia.
- Wallenstein, M., McNulty, S., Fernandez, I., Boggs, J., Schlesinger, W., 2006. Nitrogen fertilization decreases forest soil fungal and bacterial biomass in three long-term experiments. *Forest Ecology and Management* 222 (1-3), 459–468.
- Wang, G., Ruan, H., Tang, Y., Luan, Y., Chen, Y., Tao, Z., 2008. Seasonal fluctuation of soil microbial biomass carbon in secondary oak forest and *Pinus taeda* plantation in north subtropical area of China. *Ying yong sheng tai xue bao, The Journal of Applied Ecology* 19 (1), 37–42.
- Xiao, L., Bi, Y., Du, S., Wang, Y., Guo, C., 2019. Effects of re-vegetation type and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on soil enzyme activities and microbial biomass in coal mining subsidence areas of Northern China. *Catena* 177, 202–209.
- Xu, X., Schimel, J., Thornton, P., Song, X., Yuan, F., Goswami, S., 2014. Substrate and environmental controls on microbial assimilation of soil organic carbon: a framework for Earth system models. *Ecology Letters* 17 (5), 547–555.
- Yan, J., Wang, L., Hu, Y., Tsang, Y., Zhang, Y., Wu, J., Sun, Y., 2018. Plant litter composition selects different soil microbial structures and in turn drives different litter decomposition pattern and soil carbon sequestration capability. *Geoderma* 319, 194–203.
- Yi, Z., Fu, S., Yi, W., Zhou, G., Mo, J., Zhang, D., Zhou, L., 2007. Partitioning soil respiration of subtropical forests with different successional stages in south China. *Forest Ecology and Management* 243 (2-3), 178–186.
- Yoder, A., 1936. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of physical nature of erosion losses. *Journal American Society of Agronomy* 28, 338–351.
- Yong, P., Song, S., Li, Z., Shun, L., Chen, G., Hu, H., Yi, T., 2019. Influences of nitrogen addition and aboveground litter-input manipulations on soil respiration and biochemical properties in a subtropical forest. *Soil Biology and Biochemistry* 142, 1–12.
- Yousuf, B., Keshri, J., Mishra, A., Jha, B., 2012. Application of targeted metagenomics to explore abundance and diversity of CO₂-fixing bacterial community using cbbL gene from the rhizosphere of *Arachis hypogaea*. *Gene* 506 (1), 18–24.
- Zhang, C., Liu, G., Xue, S., Wang, G., 2016. Soil bacterial community dynamics reflect changes in plant community and soil properties during the secondary succession of

- abandoned farmland in the Loess Plateau. *Soil Biology and Biochemistry* 97, 40–49.
- Zhang, Y., Wei, Z., Li, H., Guo, F., Wu, P., Zhou, L., Ma, X., 2017. Calidad bioquímica y acumulación de materia orgánica del suelo en una secuencia de edad de las plantaciones de *Cunninghamia lanceolata* en el sur de China. *Journal of Soils and Sediments* 17 (9), 2218–2229.
- Zhou, L., Liu, Y., Zhang, Y., Sha, L., Song, Q., Zhou, W., Li, J., 2019. Soil respiration after six years of continuous drought stress in the tropical rainforest in Southwest China. *Soil Biology and Biochemistry* 138, 1–11.
- Zhu, B., Van Dijk, G., Fritz, C., Smolders, A., Pol, A., Jetten, M., Ettwig, K., 2012. Anaerobic oxidization of methane in a minerotrophic peatland: enrichment of nitrite-dependent methane-oxidizing bacteria. *Applied and Environmental Microbiology* 78 (24), 8657–8665.

