

Flujo de CO₂ del suelo bajo diferentes coberturas de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá

● María Catalina Lopera

Jardín Botánico de Bogotá “José Celestino Mutis”, Bogotá, D.C., Colombia

Resumen

El flujo de CO₂ del suelo contribuye con las emisiones de gases de efecto invernadero y varía de acuerdo con la topografía, la calidad de los suelos, las características de la vegetación y los usos del suelo, entre otros. En este estudio se evaluó la variación del flujo de CO₂ del suelo bajo tres coberturas vegetales de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá y su relación con factores edafoclimáticos. Se escogieron tres sitios de muestreo por cobertura y se midió el flujo de CO₂ del suelo en mayo, julio y septiembre del 2018. Se encontró que el flujo de CO₂ del suelo fue mayor en las plantaciones de eucalipto y menor en los herbazales abiertos de páramo, y fue mayor en mayo (el mes con mayor precipitación), y menor en septiembre. Se encontraron relaciones positivas entre el flujo de CO₂ y la temperatura del ambiente, la temperatura del suelo y la elevación. Los resultados obtenidos sugieren que el tipo de cobertura vegetal y la temperatura son dos factores que determinan los procesos de respiración y flujo de CO₂ del suelo. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Respiración del suelo; Páramo; Eucalipto; Bosques andinos.

Soil CO₂ flux under different land-cover types in the Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental of Bogotá

Abstract

The soil CO₂ efflux contributes to greenhouse gases and varies according to topography, soil quality, vegetation characteristics, and land use, among others. The aim of this study was to estimate CO₂ efflux variation from soils under three land-cover types located in Bogotá's *Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental* and its relationship with climate and edaphic factors. For each cover, three sampling areas were selected and measurements were made in May, July, and September 2018. Soil CO₂ efflux was higher in eucalyptus plantations and lower in the páramo grasslands. The highest soil CO₂ efflux occurred in the rainy season (May) and the lowest in the drier season (September). A positive relationship was found between soil CO₂ efflux and environmental temperature, soil temperature, and elevation. The results suggest that differences in land cover and temperature are drivers of soil respiration and soil CO₂ effluxes in the study area. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Soil respiration; Land cover; Páramo; Eucalyptus; Andean forests.

Introducción

El carbono contenido en el suelo puede representar hasta tres veces más del que hay en la atmósfera y la vegetación (Pouyat, *et al.*, 2002); su liberación en forma de CO₂ desde la superficie es resultado de los procesos de respiración del suelo que cumplen un papel primordial en el ciclo global del carbono y el balance del CO₂ en la atmósfera (Raich & Schlesinger, 1992), además de que constituye uno de los gases de efecto invernadero que contribuye al cambio climático global (Lal, 2004; Scharlemann, *et al.*, 2014). Para entender las dinámicas del carbono como fuente o sumidero en los ecosistemas y, así, su equilibrio global, es importante medir y entender el intercambio del flujo de CO₂ entre los suelos y la atmósfera (Kutzbach, *et al.*, 2007).

Los principales factores determinantes de la respiración del suelo y el flujo del CO₂ hacia la atmósfera son la temperatura y la humedad del suelo (Riveros-Iregui, *et al.*, 2008;

Deb, *et al.*, 2015), pues influyen en la actividad microbiana y la diversidad de la comunidad de microorganismos (FAO, 2017). Estos dos factores varían espacialmente, por ejemplo, a escala del paisaje se ven afectados por la topografía y por diferencias en la cobertura vegetal (Pacific, *et al.*, 2008). Existen otros factores abióticos que influyen en la respiración, entre los cuales son importantes algunas propiedades físicas del suelo como la textura y la densidad aparente (Rochette & Hutchinson, 2005; Luo & Zhou, 2006).

En las últimas décadas ha aumentado el interés por entender el efecto de los cambios en el uso del suelo y la transformación del paisaje en el *stock* del carbono y en el flujo de CO₂ del suelo frente a las acciones de mitigación

Correspondencia:

María Catalina Lopera; clopera@jbb.gov.co

Recibido: 27 de diciembre de 2018

Aceptado: 8 de mayo de 2019

Editor: Sandra Baena

del cambio climático (Lal, 2004; Carvajal, *et al.*, 2009; Rodríguez, 2016). Se ha encontrado que la respiración del suelo está relacionada con la cobertura de la vegetación (Riveros-Iregui, *et al.*, 2008; Decina, *et al.*, 2016; Sánchez, 2016), con las comunidades vegetales (Metcalfe, *et al.*, 2011), con el estado de sucesión (Wang, *et al.*, 2015), con las especies vegetales dominantes en el ecosistema (van Haren, *et al.*, 2010) y con los cambios en el uso del suelo (Raich & Schlesinger, 1992; De Jong, 2001; Lal, 2004; Pacific, *et al.*, 2008; Oyonarte, *et al.*, 2012; Scharlemann, *et al.*, 2014).

En Colombia se han realizado estudios para estimar el contenido de carbono en la biomasa aérea de los bosques (Phillips, *et al.*, 2011; Borrero-Benavides, 2012; Sanabria & Puentes, 2017) y en el suelo (Carvajal, *et al.*, 2009; Rodríguez, 2016; Sánchez & Romero, 2016). En cuanto a la estimación del flujo de CO₂ del suelo hacia la atmósfera, los esfuerzos son escasos. Sin embargo, se encuentran algunos estudios sobre la respiración del suelo en áreas con diferentes usos del suelo (Murcia & Ochoa, 2008; Vásquez, *et al.*, 2013), y sobre el flujo de carbono en páramos (Peña, 2015), en ecosistemas altoandinos (Murcia, *et al.*, 2012), en sistemas agroforestales (Sánchez, 2016) y en diferentes coberturas urbanas y periurbanas en Bogotá (Bonell, 2018).

Dada la importancia de conocer mejor cómo se comporta y cómo varía el flujo de CO₂ del suelo y cuáles son los factores que lo afectan, es necesario estudiar sus dinámicas para generar discusiones y elementos teóricos y prácticos que ayuden en la adopción de decisiones relacionadas con el uso y la conservación de las diferentes coberturas vegetales, incluyendo el manejo de la dinámica del carbono del suelo frente a escenarios de cambio climático. En esta investigación se planteó evaluar el flujo del CO₂ del suelo en la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá, para responder a las siguientes preguntas de investigación: ¿cómo varía el flujo de CO₂ del suelo en diferentes coberturas dentro de esta Reserva? y ¿cómo se relacionan algunos factores edafoclimáticos con el flujo de CO₂ del suelo en sus diferentes coberturas?

Materiales y métodos

Área de estudio. La Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá se ubica en el oriente de la ciudad y está conformada por un paisaje de montaña. La reserva tiene una extensión de 14.000 ha y se encuentra en un rango de elevación entre los 2.650 y los 3.600 m. Se extiende desde el sur de la ciudad a partir de las quebradas El Amoladero y Yomasa, tributarias del río Tunjuelo, hasta la cuenca de la quebrada Torca, en el norte. En la zona sur, el régimen de precipitaciones es monomodal, con un máximo de precipitación a mitad del año y un valor medio multianual de 1.292 mm (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR, 2006). En la zona norte de la reserva se presenta un régimen de precipitaciones tipo bimodal con dos periodos húmedos entre abril y mayo y entre octubre y noviembre; la precipitación media multianual es de 916 mm (CAR, 2006).

La Reserva se ha visto sometida a muchas transformaciones a lo largo de los años. El resultado actual es un mosaico de coberturas en el que se encuentran fragmentos de bosques, arbustales y matorrales, plantaciones forestales de pino (*Pinus patula*) y eucalipto, (*Eucalyptus globulus*), áreas dominadas por especies invasoras como el retamo espinoso (*Ulex europaeus*), pastizales, cultivos, suelos dedicados a la ganadería y, en las zonas de mayor altitud (más de 3.000 m), áreas con coberturas de herbazales abiertos de páramo, pajonales y frailejonales (Conservación Internacional - CI & CAR, 2009). Para este estudio se escogieron tres coberturas representativas de la reserva: bosque secundario con dosel arbóreo discontinuo, plantaciones forestales de eucalipto y herbazales abiertos de páramo.

En la cobertura de bosque secundario los tres sitios de muestreo fueron: en el norte, los Bosques de Torca entre los 2.600 y los 2.950 m de elevación, donde se encuentra el fragmento de bosque mejor conservado de la reserva; el Club La Aguadora, entre los 2.400 y los 2.700 m de elevación, y en el sur, la Escuela de Logística (localidad de San Cristóbal), entre los 2.800 y los 2.950 m de elevación. En la cobertura de herbazal de páramo se seleccionaron tres sitios de muestreo: al norte, en la cuchilla de los cerros Orientales, limitando al oriente con el antiguo camino al Meta, entre los 2.900 y los 3.200 m de elevación; en el oriente de la Reserva, en el Parque Ecológico Matarredonda, vereda Los Verjones, entre los 3.300 y los 3.500 m de elevación, y al sur, en el área rural de la vereda Los Soches, entre los 2.700 y los 3.400 m de elevación. En las plantaciones forestales de eucalipto, los sitios se ubicaron en la Reserva Umbral Horizontes, al oriente del barrio Los Rosales, entre los 2.710 y los 2.750 m de elevación, en el Parque Nacional - etapa II, entre los 2.500 y los 2.680 m de elevación, y en la Escuela de Logística, al sur de la Reserva, a 2.800 m de elevación (Figura 1).

Métodos de campo

Se realizaron tres muestreos en cada cobertura en los meses de mayo, julio y septiembre. En cada sitio de muestreo se establecieron tres parcelas de 5 x 5 m con una distancia de, por lo menos, 50 m entre ellas y distribuidas de manera aleatoria. En cada parcela se instalaron cinco collares de medición en cada esquina y en el centro. En cada cobertura se ubicaron nueve parcelas de medición. Cada parcela se georreferenció y se marcó para que las siguientes mediciones fueran en el mismo lugar.

Todas las mediciones del flujo de CO₂ se realizaron entre las 9:00 am y las 2:00 pm. Cada mes se pudo la vegetación sobre la superficie antes de realizar las mediciones para minimizar las variaciones por el efecto de la respiración aérea autótrofa de la vegetación (Pacific, *et al.*, 2008). Para determinar el flujo de CO₂ del suelo se utilizó un equipo de análisis de CO₂ de cámara cerrada portátil, con un analizador infrarrojo incorporado (IRGA), modelo EGM-5, (PP Systems, 2017) y se realizó cada medición durante 120 segundos (Sainju, *et al.*, 2012).

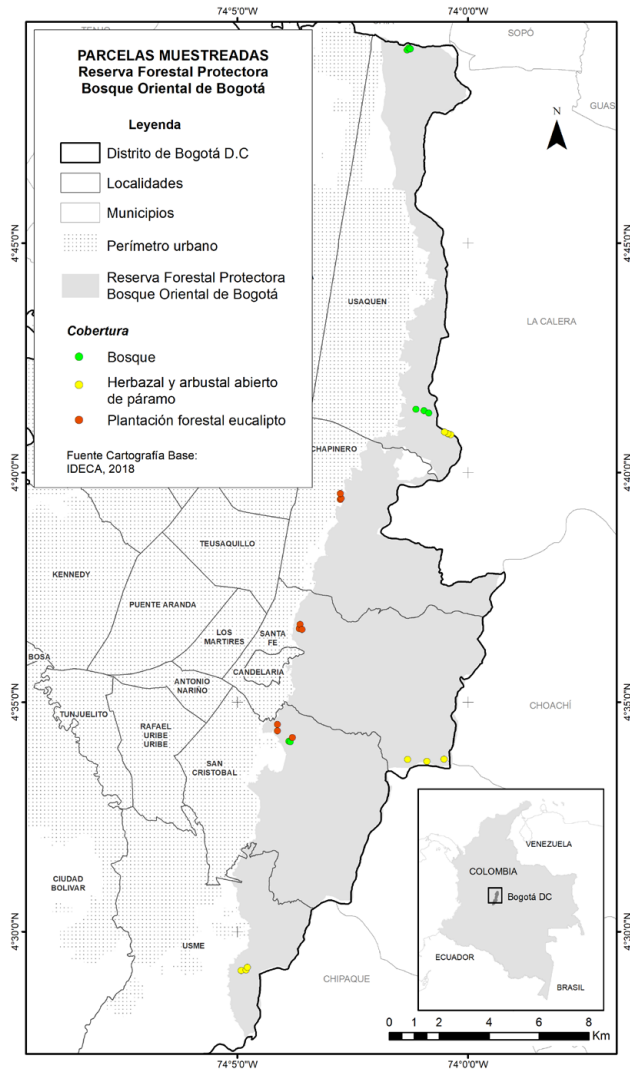


Figura 1. Ubicación de las parcelas de muestreo en las tres coberturas estudiadas. Elaboró: Monroy, J. Jardín Botánico de Bogotá, 2018.

Simultáneamente, se registraron la temperatura y la humedad del suelo a 10 cm de profundidad al lado de la cámara de medición del flujo de CO_2 (Oyonarte, *et al.*, 2012; Sainju, *et al.*, 2012). La temperatura del suelo se midió mediante una sonda de temperatura STP-2 incorporada al equipo EGM-5 (PP Systems, 2017), y la humedad mediante un higrómetro para suelo marca EXTECH®, modelo MO-750. Además, en cada punto de medición se registraron la temperatura y la humedad del ambiente mediante un medidor de clima marca Kestrel, 5500.

Para analizar la variación de la precipitación durante el periodo de muestreo (mayo a septiembre de 2018), se consultó la información disponible en la página de Internet de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá dispuesta por la Secretaría Distrital de Ambiente (2018). En esta página se encuentra la información de distintas estaciones de monitoreo, por lo que se seleccionaron las que se encuentran más cercanas a los sitios de muestreo.

Análisis estadístico. Para analizar las diferencias entre coberturas se promediaron los valores de los cinco collares de medición de cada parcela. Con los datos resultantes se llevaron a cabo pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk ($n < 30$) y de homogeneidad de varianzas de Levene. Los datos de las coberturas se ajustaron a la distribución normal y presentaron homogeneidad de varianzas, por lo tanto, para los análisis se utilizaron pruebas paramétricas.

Para evaluar si las tres mediciones realizadas para cada cobertura presentaban diferencias significativas, se hicieron análisis de varianza (ANOVA) para muestras repetidas y se complementó con pruebas de Tukey para probar la diferencia entre muestras pareadas. Las diferencias del flujo de CO_2 del suelo y las variables ambientales en las diferentes coberturas se evaluaron mediante análisis de ANOVA y pruebas pareadas de Tukey.

Para determinar la relación entre el flujo de CO_2 del suelo y las variables ambientales se hicieron análisis de correlación de Spearman. Además, se transformaron los datos mediante logaritmo natural para ajustar un modelo de regresión múltiple lineal, el cual se evaluó mediante regresión paso a paso para conocer el valor predictivo y la significación de cada variable en el modelo. Por último, se incluyó la variable de la elevación para conocer si esta tenía significación en el modelo.

En los análisis estadísticos se empleó el programa estadístico PAST®, versión 3.21, 2018, y el Minitab®, versión 15 (Minitab® Inc. 2007).

Resultados

Flujo de CO_2 del suelo. En la cobertura de bosque, el promedio del flujo de CO_2 fue de $3,06 \pm 1,5 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ y varió entre $1,03$ y $7,14 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Las mediciones en los tres meses presentaron diferencias significativas ($F=4,33$; $p=0,03$), siendo las medidas registradas en mayo más altas y significativamente diferentes a las tomadas en julio y septiembre ($p < 0,05$). En la cobertura de herbazal de páramo el promedio de flujo de CO_2 fue de $1,85 \pm 1,41 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ y varió entre $0,61$ y $4,9 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Las mediciones en los tres meses no presentaron diferencias significativas ($F=0,51$; $p=0,60$); en el mes de mayo se presentó el valor promedio más alto (Figura 2). En la cobertura de plantación de eucalipto el promedio de flujo de CO_2 del suelo fue de $3,24 \pm 1,5 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ y varió entre $1,8$ y $5,15 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Las mediciones en los tres meses presentaron diferencias significativas ($F=6,48$; $p=0,010$), con el valor promedio más alto en mayo ($3,6 \pm 1,59 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$).

En los tres meses evaluados, el flujo de CO_2 del suelo en la cobertura de herbazal abierto de páramo fue menor que en la de bosque y eucalipto (Figura 2). Las coberturas presentaron diferencias significativas entre sí ($p < 0,05$). En mayo y septiembre la cobertura de herbazal abierto de páramo fue significativamente diferente a la de eucalipto ($Q=4,33$; $p=0,014$), mientras que los valores registrados para la de bosque fueron similares a los registradas en la de eucalipto ($Q=1,099$; $p=0,72$).

Temperatura del suelo. En la cobertura de bosque la temperatura varió entre 10,66 y 12,5 °C; la mayor temperatura promedio se registró en el mes de mayo y la menor fue en julio. En la cobertura de herbazal abierto de páramo, la temperatura varió entre 8,5 y 14,5 °C; el mes con la temperatura promedio más alta fue mayo y la menor temperatura fue en julio. En la cobertura de plantación forestal de eucalipto la temperatura varió entre 11,2 y 14,3 °C; el mes con mayor temperatura promedio fue mayo y el de menor fue julio (Tabla 1). La temperatura del suelo para todos los meses fue menor en las coberturas de herbazal de páramo y bosque y mayor en las plantaciones de eucalipto con diferencias significativas ($p < 0,05$).

Humedad del suelo. En la cobertura de bosque la humedad varió entre 2 y 9,8 %; la mayor humedad promedio se registró en el mes de mayo y la menor fue en septiembre. En la cobertura de herbazal abierto de páramo la humedad del suelo varió entre 3 y 12,5 %; el mes con la humedad promedio más alta fue julio y el de menor humedad fue septiembre. En la cobertura de plantación forestal de eucalipto la humedad varió entre 1 y 8,9 %; el mes con mayor humedad promedio fue julio y el de menor fue septiembre (Tabla 1).

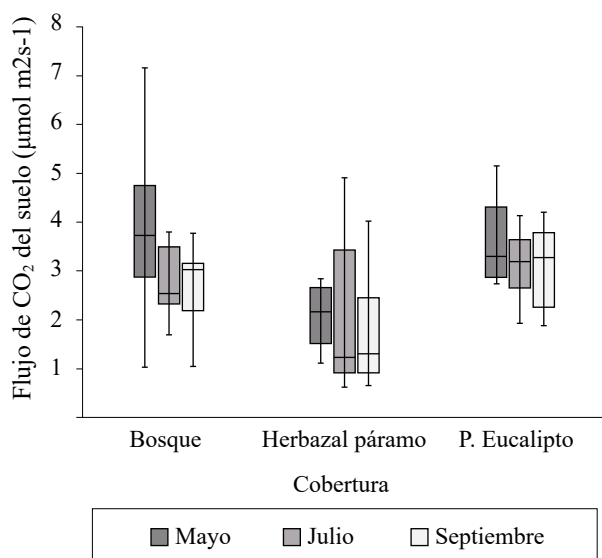


Figura 2. Flujo de CO₂ registrado en las diferentes coberturas en los tres meses de muestreo

La humedad del suelo para todos los meses de muestreo fue menor en la cobertura de plantación forestal de eucalipto y mayor en la de bosque y herbazal de páramo, presentándose diferencias significativas ($p < 0,05$). En mayo y septiembre la cobertura de plantación de eucalipto presentó diferencias significativas con las otras dos coberturas ($p < 0,05$).

Temperatura ambiente. En la cobertura de bosque la temperatura varió entre 12 y 20°C; en la de herbazal abierto de páramo varió entre 7,4 y 18,24 °C, y en la cobertura de plantación forestal de eucalipto esta varió entre 13,8 y 20,68 °C. La temperatura ambiente para todos los meses de muestreo fue menor en las coberturas de herbazal de páramo y la cobertura con mayor valor varió en todos los meses: en mayo fue en la de bosque, en julio en la de eucalipto y en septiembre en la de arbustal (Tabla 1). En los tres meses de muestreo se encontraron diferencias significativas entre las coberturas ($p < 0,05$) y la cobertura de herbazal de páramo presentó diferencias significativas con las otras dos ($p < 0,05$).

Humedad relativa. En la cobertura de bosque la humedad relativa varió entre 64,3 y 99,8 %; en la de herbazal abierto de páramo, entre 58 y 99 %, y en la de plantación forestal de eucalipto, entre 57 y 92 %. En todas las coberturas el mes con mayor humedad promedio fue julio y el de menor fue septiembre (Tabla 1).

La humedad relativa para todos los meses de muestreo fue menor en la cobertura de plantación forestal de eucalipto y mayor en las de bosque y herbazal de páramo, presentándose diferencias significativas entre las plantaciones de eucalipto y las de páramo y bosque ($p < 0,05$).

Relaciones entre el flujo de CO₂ del suelo y los factores edáficos y ambientales. Según los análisis de correlación de Spearman, el flujo de CO₂ del suelo presentó correlaciones significativas positivas con la temperatura del suelo y la temperatura ambiente y negativas con la humedad del suelo y la humedad del ambiente (Tabla 2). Con respecto a las variables ambientales, se observaron correlaciones significativas entre todos los factores, siendo la más alta entre la humedad relativa y la temperatura ambiente (Tabla 2). También se encontraron correlaciones negativas entre la precipitación y el flujo de CO₂ del suelo en los meses de mayo ($r_s = -0,39$; $p < 0,05$) y julio ($r_s = -0,27$; $p < 0,05$).

Tabla 1. Valores promedio y desviación estándar de las condiciones ambientales registradas en las coberturas estudiadas (para cada cobertura: n=9)

Variable	Bosque			Herbazal abierto de páramo			Plantación de eucalipto		
	Mayo	Julio	Sept.	Mayo	Julio	Sept.	Mayo	Julio	Sept.
Humedad del suelo (%)	7±2,1	6,1±1,8	5,2±2,1	7,4±2,2	7,5±2,1	7,8±2,9	4,0±2,4	5,03±2,8	2,1±0,6
Temperatura del suelo (°C)	12,1±0,5	11,6±0,4	11,4±0,5	11,6±1,9	10,1±1,5	10,5±1,7	13,4±0,5	12,4±0,7	12,9±0,5
Humedad ambiente (%)	69,8±3,3	91,3±6	76,5±7,3	80,8±7,4	91,8±8,2	79,1±13,8	78,1±4,6	81,2±8,2	65,3±6,8
Temperatura ambiente (°C)	19±1,7	14,1±1,7	16,0±0,7	14,7±2,7	10,5±1,9	12,7±3,7	17±0,5	15,4±1,3	18,3±1,9

Tabla 2. Coeficientes de correlación (r_s) de Spearman entre el flujo de CO₂ del suelo y los factores edáficos y ambientales evaluados

	Flujo de CO ₂ del suelo	Humedad del suelo	Temperatura del suelo	Humedad ambiente
Humedad del suelo	-0,25*			
Temperatura del suelo	0,39*	-0,50*		
Humedad ambiente	-0,16*	0,20*	-0,44*	
Temperatura ambiente	0,28*	-0,35*	0,58*	-0,71*

* Significativo para $p < 0,05$

En cuanto a la relación entre el flujo de CO₂ y las variables evaluadas, se encontró una relación significativa entre este y la temperatura del ambiente y del suelo y la elevación ($r^2=0,40$; $F_{3,126}=28,48$; $p<0,001$), la cual se describe mediante la siguiente ecuación:

$$\ln(\text{Flujo CO}_2) = -17,5 + 1,58 \ln(T \text{ ambiente}) + 1,45 \ln(T \text{ suelo}) + 1,35 \ln(\text{elevación}).$$

Discusión

El flujo de CO₂ del suelo fue diferente en las coberturas de herbazal de páramo y en la de plantaciones de eucalipto, lo que indica que el tipo de vegetación influye en la respiración del suelo, como se ha demostrado en diferentes estudios (Vásquez, *et al.*, 2013; Grand, *et al.*, 2016). Sin embargo, en otros estudios, como el de Peña (2015), se reporta que no se encontraron diferencias significativas en el flujo de CO₂ del suelo entre coberturas de diferentes usos de suelo en el páramo de Guerrero, Cundinamarca.

La cobertura que presentó el mayor flujo de CO₂ del suelo fue la de plantaciones forestales de eucalipto, en tanto que el menor se registró en la de herbazal abierto de páramo. Estos resultados concuerdan con lo encontrado por Bonell (2018), quien reportó mayor flujo de CO₂ en plantaciones forestales que en coberturas de bosque, y menor en los herbazales y arbustales de páramo. Uno de los factores que puede explicar el mayor flujo de CO₂ del suelo en plantaciones forestales es la textura del suelo, pues en los tres sitios de muestreo con este tipo de cobertura los suelos se catalogaron como franco-arenosos, con un contenido de arena superior al 50 %, lo cual concuerda con Bonell (2018), quien reportó suelos franco-arenosos en sitios de muestreo cercanos a las plantaciones de eucalipto evaluadas en este estudio. Un alto porcentaje de arena en el suelo puede significar mayor aireación y transporte de CO₂ hacia la atmósfera.

Los resultados en páramo fueron mayores que los reportados por Bonell (2018) en el páramo de Cruz Verde y por Peña (2015) en el páramo de Guerrero, Cundinamarca, y menores en plantaciones forestales que lo reportado por Bonell (2018). Estas diferencias se pueden explicar por el hecho de que la respiración del suelo presenta una alta variabilidad tanto espacial como temporal, ya que depende de diversos factores como el tipo de suelos y su textura, y algunas propiedades químicas y físicas como la temperatura y la humedad del suelo (Fóti, *et al.*, 2016). Además, se deben tener en cuenta las distintas técnicas de medición, el

número de muestras y el diseño de los muestreos, los cuales podrían explicar las diferencias entre los resultados de este estudio y los reportados previamente.

En las tres coberturas evaluadas, el flujo de CO₂ del suelo fue mayor en mayo que en septiembre, lo cual se añade a la relación encontrada con la precipitación que, aunque baja, sugeriría que las condiciones climáticas influyen en la respiración del suelo, como se ha demostrado en estudios sobre la variación estacional de la respiración del suelo, en los cuales también se ha observado que la interacción entre la temperatura y la humedad, y su cambio a lo largo del año, determinan la variación de la respiración del suelo a lo largo del tiempo (Merbold, *et al.*, 2011).

La relación positiva encontrada entre el flujo de CO₂ y la temperatura del ambiente se ha reportado en otros estudios como el de Murcia, *et al.* (2012), quienes concluyeron que los cambios en la temperatura media del ambiente pueden afectar las tasas de respiración diurna en mayor medida que la humedad relativa. Por otra parte, también se encontraron relaciones positivas con la temperatura del suelo, lo cual concuerda con lo reportado en la literatura, pues se ha encontrado que si aumenta la temperatura del suelo, el flujo de CO₂ se incrementa, puesto que induce a cambios en las tasas de respiración de las raíces y de descomposición de la materia orgánica (Wang, *et al.*, 2010; Carvalho, *et al.*, 2016; Grand, *et al.*, 2016); asimismo, se ha encontrado que la relación de la respiración del suelo con la temperatura se observa cuando el contenido de agua del suelo no es una variable limitante (Luo & Zhou, 2006). Esto explica la correlación entre la temperatura y la humedad, descrita ampliamente, y que afecta la respiración del suelo (Luo & Zhou, 2006). Ello se ha observado en diferentes estudios en los que el efecto de la temperatura sobre el flujo de CO₂ se mostró dependiente del contenido de agua del suelo y varió temporalmente dependiendo de las condiciones de humedad (Wang, *et al.*, 2015; Fóti, *et al.*, 2016).

La relación encontrada entre la temperatura y el flujo de CO₂ del suelo contribuye a explicar las diferencias entre las coberturas evaluadas. En el páramo, donde fue menor el flujo de CO₂, las temperaturas registradas fueron las más bajas. Esto influye sobre la actividad de los microorganismos y la descomposición de la materia orgánica presente en el suelo. En la cobertura de bosque se presentaron los valores intermedios, tanto de flujo de CO₂ como de

temperatura; debe tenerse en cuenta, también, que en los bosques evaluados se observó una gruesa capa de materia orgánica en descomposición. Por último, en la cobertura de plantaciones de eucalipto se registraron los valores más altos de temperatura del suelo y del ambiente, así como los valores más altos de flujo de CO₂.

Aunque la humedad del suelo se considera uno de los principales factores que influyen en la respiración del suelo y la actividad de los microorganismos, en este trabajo se encontró una correlación muy baja con el flujo de CO₂ del suelo, situación que también ha sido reportada en estudios de respiración del suelo en los que la humedad del suelo no es una limitación (**Jordan, et al., 2009; Peña, 2015**). Para saber si este es el caso en las coberturas aquí estudiadas, debería evaluarse este aspecto en estudios futuros.

En múltiples publicaciones se ha reportado que el flujo de CO₂ del suelo tiene una gran variabilidad temporal (**Murcia & Ochoa, 2008; Merbold, et al., 2011; Decina, et al., 2016**), y espacial (**Jordan, et al., 2009**), ya que son múltiples los factores y procesos que pueden determinarlo, por ejemplo, las diferencias en el rango altitudinal en el que se evalúe, pues a mayor altitud disminuye el flujo de CO₂ del suelo (**Carvalho, et al., 2016; Sun, et al., 2018**), lo cual se corroboró en el presente estudio al relacionar el flujo de CO₂ del suelo con los datos de elevación.

A pesar de que se encontraron variables edafoclimáticas que permitieron explicar la variabilidad del flujo del CO₂, se debe tener en cuenta que existen otros factores que pueden afectar la respiración del suelo y que no se tuvieron en cuenta en este estudio; es el caso de las concentraciones de algunos elementos químicos como el nitrógeno, el cual se ha comprobado que tiene gran influencia sobre los procesos de respiración del suelo y el flujo de CO₂ (**Wang, et al., 2019**).

Otros factores que se sabe que influyen en la respiración del suelo son el tipo de vegetación o las diferencias en el dosel, como es el caso de lo observado por **Carvalho, et al. (2016)**, quienes determinaron que las diferencias en el dosel de sistemas agroforestales cambiaron el microclima y produjeron variaciones espaciotemporales en el flujo de CO₂ del suelo. Otros autores han encontrado que las diferencias en las dinámicas del CO₂ del suelo pueden deberse a las especies de plantas que se encuentren en la superficie (**van Haren, et al., 2010**). En este estudio no se tuvo en cuenta este factor, pero puede haber influido en los resultados aquí descritos, ya que las diferentes coberturas evaluadas presentaron diferentes tipos de dosel y de especies dominantes.

Conclusiones

El flujo de CO₂ del suelo varió según las diferentes coberturas vegetales evaluadas en la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá, especialmente entre las de herbazal abierto de páramo y las de plantación de eucalipto. El flujo de CO₂ del suelo fue mayor en las plantaciones forestales de eucalipto y menor en los herbazales abiertos de páramo. La temperatura del suelo y la temperatura ambiental, así como

la elevación, son los factores que más se relacionaron con el flujo de CO₂ del suelo, lo que explica, a su vez, la variación en la respiración del suelo.

Agradecimientos

Este proyecto fue financiado por el proyecto 1121 de la Sub-dirección Científica del Jardín Botánico de Bogotá. Agradezco este apoyo, así como el brindado por el equipo de profesionales, técnicos y operativos de la línea de Investigación en Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos y por su coordinador, Jairo Solorza. Por último agradezco los permisos de ingreso y trabajo en las instalaciones en las que se llevó a cabo el trabajo de campo.

Conflicto de intereses

La autora declara que no tiene ningún conflicto de intereses que pueda influir en el proceso de revisión por pares y la publicación del artículo.

Referencias

- Bonnell, A. C. (2018)**. Monitoreo del flujo del carbono presente en el suelo en 675m² de parcelas establecidas para evaluar los efectos de cambio climático. Documento de trabajo. Jardín Botánico de Bogotá. Bogotá. p. 77.
- Borrero-Benavides, J. C. (2012)**. Biomasa aérea y contenido de carbono en el campus de la Universidad Pontificia Javeriana de Bogotá. Trabajo de grado. Ecología, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Carvajal, A., Feijoo, A., Quintero, H., & Rondón, M. (2009)**. Carbono orgánico del suelo en diferentes tipos de uso del terreno en paisajes andinos colombianos. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. **9** (3): 222-235.
- Carvalho Gomes, L., Cardoso, I. M., Mendonca, E. S., Braganca, R., Schiavon, V., Sena, T. (2016)**. Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. *Agricultural and Forest Meteorology*. **224**: 30-39.
- Conservación Internacional-CI & Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR. (2009)**. Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá: Inventario de Fauna. Bogotá. 133 p.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR. (2006)**. Plan de manejo de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá. Documento principal. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR. Bogotá.
- Deb, S., Bhadoria, P. B. S., Mandal, B., Rakshit, A., Singh, H. B. (2015)**. Soil organic carbon: Towards better soil health, productivity and climate change mitigation. *Climate Change and Environmental Sustainability*. **3** (1): 26-34. Doi: 10.5958/2320-642X.2015.00003.4
- Decina, S. M., Hutyra, L. R., Getson, J. M. Reinmann, A. B., Short Gianotti, A. G., Templer P. H. (2016)**. Soil respiration contributes substantially to urban carbon fluxes in the greater Boston area. *Environmental Pollution*. **212**: 433-439.
- De Jong, B. (2001)**. Cambio de uso de suelo y flujos de carbono en los Altos de Chiapas, México. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, p. 11. Valdivia, Chile.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO. (2017)**. Soil Organic Carbon: The hidden potential. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 77 p.

- Fóti, S., Balogh, J., Herbst, M., Papp, M., Koncz, P., Bartha, S., Acosta, M.** (2016). Metaanalysis of field scale spatial variability of grassland soil CO₂ efflux: Interaction of biotic and abiotic drivers. *Catena*. **143**: 78-89.
- Grand, S., Rubin, A., Verrecchia, E., Vittoz, P.** (2016). Variation in soil respiration across soil and vegetation types in an alpine valley. *PLoS ONE*. **11** (9): e0163968. Doi:10.1371/journal.pone.0163968
- Jordan, A., Jurasinski, G., Glatzel, S.** (2009). Small scale spatial heterogeneity of soil respiration in an old growth temperate deciduous forest. *Biogeosciences Discuss*. **6**: 9977-10005.
- Kutzbach, L., Schneider, J., Sachs, T., Giebels, M., Nykanen, H., Shurpali, N. J., Martikainen, P. J., Alm, J., Wilmking, M.** (2007). CO₂ flux determination by closed-chamber methods can be seriously biased by inappropriate application of linear regression. *Biogeosciences*. **4**: 1005-1025.
- Lal, R.** (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*. **123**: 1-22.
- Luo, Y. & Zhou, X.** (2006). *Soil Respiration and the Environment*. Academic Press, Elsevier, Inc. USA. 316 p.
- Merbold, L., Ziegler, W., Mukelabai, M. M., Kutsch, L.** (2011). Spatial and temporal variation of CO₂ efflux along a disturbance gradient in a miombo woodland in Western Zambia. *Biogeosciences*. **8**: 147-164. Doi: 10.5194/bg-8-147-2011.
- Metcalf, D. B., Fisher, R. A., Wardle, D. A.** (2011). Plant communities as drivers of soil respiration: pathways, mechanisms, and significance for global change. *Biogeosciences*. **8**: 2047-2061.
- Murcia-Rodríguez, M. A. & Ochoa-Reyes, M. P.** (2008). Respiración del suelo en una comunidad de pastizal del bosque altoandino en la cuenca del río Pamplonita, Colombia. *Caldasia*. **30** (2): 337-353.
- Murcia-Rodríguez, M. A., Ochoa-Reyes, M. P., Poveda-Gómez, F.E.** (2012). Respiración del suelo y caída de hojarasca en el matorral del bosque altoandino (Cuenca del río Pamplonita, Colombia). *Caldasia*. **34** (1): 165-185.
- Oyonarte, C. Rey, A., Raimundo, J., Miralles, I., Escribano, P.** (2012). The use of soil respiration as an ecological indicator in arid ecosystems of the SE of Spain: Spatial variability and controlling factors. *Ecological Indicators*. **14**: 40-49. Doi: 10.1016/j.ecolind.2011.08.013.
- Phillips J.F., Duque A.J., Yepes A.P., Cabrera K.R., García M.C., Navarrete D.A., Álvarez E., Cárdenas D.** (2011). Estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia. Estratificación, alometría y métodos analíticos. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 68 p.
- Pacific, V. J., McGlynn, B. L., Riveros-Iregui, D. A., Welsh, D. L., Epstein, H.** (2008). Variability in soil respiration across riparian-hillslope transitions. *Biogeochemistry*. **91**: 51-70. Doi: 10.1007/s10533-008-9258-8.
- Peña, D. C.** (2015). Variabilidad del flujo de CO₂ del suelo bajo diferentes coberturas vegetales en el páramo de Guerrero. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 102 p.
- Pouyat, R., Groffman, P., Yesilonis, I., Hernández, L.** (2002). Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environmental Pollution*. **116**: S107-S118.
- Raich, J. & Schlesinger, W.** (1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*. **44**: 81-99.
- Riveros-Iregui, D. A., McGlynn, B. L., Epstein, H. E., Welsh, D. L.** (2008). Interpretation and evaluation of combined measurements techniques for soil efflux: Discrete surface chambers and continuous soil CO₂ concentration probes. *Journal of Geophysical Research*. **113**: 1-11. Doi: 10.1029/2008JG000811
- Rochette, P. & Hutchinson, G.** (2005). *Measurement of soil respiration in situ: Chamber Techniques*. Publications from USDA-ARS/UNL Faculty. 1379. Nebraska, USA. 40p. Fecha de consulta: 23 de febrero de 2018. Disponible en: <http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1379>
- Rodríguez, M.** (2016). Stock de carbono del suelo, a escala local, en ocho sistemas de uso agrícola en el piedemonte llanero. Tesis de doctorado en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia. 140 p.
- Sainju, U. M., Caesar-TonThat, T., Caesar, A.** (2012). Comparison of soil carbon dioxide flux measurements by static and portable chambers in various management practices. *Soil & Tillage Research*. **118**: 123-131. Doi:10.1016/j.still.2011.10.020.
- Sanabria, Y. K. & Puentes, D. L.** (2017). Evaluación de la biomasa y captura de carbono en bosques altoandinos mediante patrones florísticos, estructurales y funcionales en la cordillera oriental, Cundinamarca. Trabajo de grado, Ingeniería Forestal. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. 74 p.
- Sánchez, D. V.** (2016). Dinámica de carbono orgánico en suelos de sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca. Trabajo de grado, Maestría en Agroforestería Tropical. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, UDCA. Bogotá. 99 p.
- Sánchez, M. R. & Romero, L. P.** (2016). Transformación del paisaje, carbono orgánico en el suelo y selección de áreas prioritarias de conservación de la Reserva Forestal Bosque Oriental (Bogotá, Colombia). Trabajo de grado. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, UDCA. Bogotá.
- Scharleman, J. P.W., Tanner, E., Hiederer, R., Kapos, V.** (2014). Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*. **5** (1): 81-91. Doi: 10.4155/cmt.13.77
- Secretaría Distrital de Ambiente.** (2018). Red de Monitoreo de la Calidad de Aire de Bogotá. Fecha de consulta: 9 de noviembre 2018. Disponible en: <http://201.245.192.252:81/>
- Sun, Q., Wang, R., Hu, Y., Yao, L., Guo, S.** (2018). Spatial variation of soil respiration and temperature sensitivity along a steep slope of semiarid Loess Plateau. *PLoS One*. **13** (4): e0195400. Doi: 10.1371/journal.pone.0195400.
- van Haren, J. L. M., Cosme de Oliveira Jr., Restrepo-Coupe, N., Hutyrá, L. de Camargo, P. B., Keller, M., Saleska S. R.** (2010). ¿Do plant species influence soil CO₂ and N₂O fluxes in a diverse tropical forest? *Journal of Geophysical Research*. **115**: G03010. Doi: 10.1029/2009JG001231
- Vásquez, J., Macías, F., Menjivar, J. C.** (2013). Respiración del suelo según su uso y su relación con algunas formas de carbono en el departamento del Magdalena, Colombia. *Bioagro*. **25** (3): 175-180.
- Wang, M., Liu, X., Zhang, J., Li, X., Wang, G., Li, X., Chen, W.** (2015). Soil respiration associated with plant succession at the meadow steppes in Songnen Plain, Northeast China. *Journal of Plant Ecology*. **8** (1): 51-60
- Wang J, Fu X, Zhang Z, Li M, Cao H, Zhou X., Ni, H.** (2019). Responses of soil respiration to nitrogen addition in the Sanjiang Plain wetland, northeastern China. *PLoS ONE*. **14** (1): e0211456. Doi: 10.1371/journal.pone.0211456