

Continuous measurement of CO₂ efflux in soil in a tropical forest plot in Barro Colorado Island, Panama Canal.

Lourdes Sugasti, B.Eng.¹, Reinhardt Pinzón, Ph.D.^{1,2}

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, ²Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH), Panamá, lourdes.sugasti@utp.ac.pa, reinhardt.pinzon@utp.ac.pa

Abstract— *Developing countries are aimed to protect and expand their forests as a mitigation action to Climate Change. Tropical soils contain a 32% of the total amount of carbon stored in soils. With the incrementation of anthropogenic CO₂ in the atmosphere, there is a necessity to understand soil CO₂ complex interaction with abiotic and biotic factors and their interplay with soil CO₂ production and transport, so a clear comprehension, could lead researchers of this subject to forecast with precise models, CO₂ flux in tropical forests soils for the next decades. This paper describes the field work that has been done for 21 months, and the preliminary results of continuously measurements of soil CO₂ flux, soil temperature and soil humidity on a 1 ha plot in the artificial island of Barro Colorado; using a closed long term chamber method with an infrared gas analyzer. The mean for soil CO₂ flux in the study period was 2.92 μmol/m²s. There is a positive correlation with soil humidity and soil temperature, soil CO₂ flux can be explained in this particular plot by this abiotic factor. Finally, we conclude that our measurements need to be done continuously and for a long period of time in order to evaluate the spatial and seasonal variability of soil CO₂ flux.*

Keywords-Soil CO₂ efflux, soil respiration, close chamber, Barro Colorado Island

Digital Object Identifier (DOI):<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.133>
ISBN: 978-0-9993443-1-6
ISSN: 2414-6390

Medición continúa de flujo de CO₂ en suelo en una parcela de bosque tropical en Isla Barro Colorado, Canal de Panamá.

Lourdes Sugasti, B.Eng.¹, Reinhardt Pinzón, Ph.D.^{1,2}

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, ²Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH), Panamá, lourdes.sugasti@utp.ac.pa, reinhardt.pinzon@utp.ac.pa

Abstract— Developing countries are aimed to protect and expand their forests as a mitigation action to Climate Change. Tropical soils contain a 32% of the total amount of carbon stored in soils. With the incrementation of anthropogenic CO₂ in the atmosphere, there is a necessity to understand soil CO₂ complex interaction with abiotic and biotic factors and their interplay with soil CO₂ production and transport, so a clear comprehension, could lead researchers of this subject to forecast with precise models, CO₂ flux in tropical forests soils for the next decades. This paper describes the field work that has been done for 21 months, and the preliminary results of continuously measurements of soil CO₂ flux, soil temperature and soil humidity on a 1 ha plot in the artificial island of Barro Colorado; using a closed long term chamber method with an infrared gas analyzer. The mean for soil CO₂ flux in the study period was 2.92 μmol/m²s. There is a positive correlation with soil humidity and soil temperature, soil CO₂ flux can be explained in this particular plot by this abiotic factors. Finally, we conclude that our measurements need to be done continuously and for a long period of time in order to evaluate the spatial and seasonal variability of soil CO₂ flux.

Keywords— soil CO₂ flux, soil respiration, closed chamber, Barro Colorado Island.

I. INTRODUCCIÓN

Los países en desarrollo son impulsados a contribuir con los esfuerzos de mitigación del cambio climático a través de la conservación, gestión y expansión de los bosques. [1]

Desafortunadamente la deforestación es la segunda fuente de emisión antropogénica de CO₂ a la atmósfera, después de la combustión de combustibles fósiles. La primera representa el 6-17 % de las emisiones globales antropogénicas de CO₂ a la atmósfera [2,3]. Cuando los bosques son talados, el carbono almacenado sobre y bajo el suelo en hojas, ramas, tallos y raíces, es liberado a través de la combustión, descomposición de materia vegetal y del carbono en el suelo, contribuyendo a las emisiones de gases de efecto invernadero especialmente en los trópicos [2,3].

En Panamá, la metodología CLASlite, ha indicado un promedio de deforestación para el período 2000–2012 de 11,415 hectáreas/año [4]. Se han otorgado concesiones en áreas de la reserva forestal de Donoso, áreas aledañas al Parque Omar Torrijos y zonas del Corredor Biológico

Mesoamericano que han sido impactadas por proyectos de minería a cielo abierto, que han incrementando la tala de forma descontrolada y han causado afectaciones a los ecosistemas en estas áreas [5]. El problema se ha agravado con la construcción de carreteras de acceso a estos proyectos, por ejemplo, la llamada “Conquista del Atlántico”, que atraviesa áreas indígenas y bosques primarios del Corredor Biológico Mesoamericano, para el desarrollo masivo de proyectos urbanísticos costeros [5, 6, 7, 8]. Además los ecosistemas de manglar han sido destruidos en la costa norte del país y se han impactado importantes humedales para el desarrollo de lujosos proyectos urbanístico, desarrollo portuario y de zonas comerciales, dejando vulnerables a estas zonas y haciendo más complicada la restauración de estos ecosistemas [9, 10,11].

Todos estos hechos contrastan sin lugar a duda, ya que Panamá, se ha comprometido a nivel internacional, a conservar y preservar los bosques con la ratificación del acuerdo de París y la participación en REDD+ [12, 13]. La temperatura media global se debe estabilizar dentro del rango de dos grados Celsius con respecto a la temperatura actual. Esto es casi imposible sin la reducción de las emisiones del sector forestal, entre otras medidas de mitigación [12]. La conservación y protección de los bosques son nuestra medida de mitigación y adaptación al cambio climático [14].

Los servicios ecosistémicos que brindan los bosques, como el abastecimiento de agua dulce, alimentos, combustible y fibra, biodiversidad, captura de carbono, aire y agua de calidad y regulación del clima; se están viendo perjudicados por la deforestación y la degradación de la tierra, lo que causa graves consecuencias económicas a escala mundial [15].

Los bosques maduros y secundarios cubren 56.7% del territorio nacional de Panamá [16], los bosques secundarios son considerados potenciales sumideros de carbono y el interés económico por ellos como medio de mitigación a las emisiones de CO₂ antropogénicas está en aumento, pero aún las dinámicas de los flujos de carbono en suelo siguen sin entenderse [17].

A través de los procesos fotosintéticos ingresa al ecosistema el CO₂ y se libera CO₂ a la atmósfera a través de los procesos de respiración, esta respiración es la ruta principal por la que se

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.133>

ISBN: 978-0-9993443-1-6

ISSN: 2414-6390

da el intercambio de CO₂ de los ecosistemas a la atmósfera y puede influir en la productividad neta del ecosistema. [18,19].

Con el balance de estas entradas y salidas de CO₂, la captura neta de CO₂ se puede determinar si un bosque actúa como sumidero o fuente de carbono.

A nivel global la masa total de carbono almacenada en los suelos es de 1576 Pg. de los cuales el 32% se encuentra en los trópicos [20], el carbono en suelo se considera de mayor importancia que el carbono almacenado en la fitomasa, ya que representa de dos a tres partes del carbono orgánico presente en la atmósfera. [21]. El carbono orgánico en suelo varía de forma temporal y espacial, los datos son escasos y poco representativos [22]. Esto se debe a que el suelo es un medio complicado que consiste de partículas órgano minerales y agregados que contienen microorganismos con diversidad de procesos fisiológicos, además de esto las propiedades del suelo varían de forma espacial y temporal en cualquier dirección [23].

El flujo de CO₂ de la superficie del suelo es el resultado de dos procesos: la respiración de la biomasa subterránea y de los macro y micro organismos que en el viven y el transporte de gases a través del suelo [18,19]. Este flujo depende de factores ambientales como la temperatura del suelo, humedad del suelo y las propiedades del suelo [19,24].

El flujo de CO₂ del suelo es transportado a la superficie tanto por difusión como por flujo másico, la difusión es controlada por el gradiente de concentración de CO₂ y el flujo de masa por las fluctuaciones de presión en la superficie del suelo [19,25].

II. METODOLOGÍA

El proyecto de investigación se desarrolla en isla Barro Colorado, esta isla tiene una extensión de 1500 ha y se eleva a unos 137 m sobre el lago Gatún [26]. El sitio escogido por la Universidad Tecnológica de Panamá, para realizar mediciones en el área conocida como AVA, cubre una parcela de 1 ha (ver Fig. #1). Esta Isla se localiza a 9°9' N y 79°51' W.

Es importante mencionar la historia particular que ha tenido isla Barro Colorado, ya que durante la construcción del Canal de Panamá áreas montañosas en las riveras del río Chagres quedaron sumergidas, esto debido a la desviación del cauce de este río para crear el lago artificial Gatún; con la construcción de la represa de Gatún en 1914, y la represa Madden en 1936. Creándose una nueva red de islas, penínsulas e islotes, cuya fauna y flora quedaron apartadas del resto de tierra firme y sometida a nuevos factores ambientales [27]. Surgiendo así isla Barro Colorado (BCI), que desde 1916 es un laboratorio natural, localizado en la ruta de tránsito del Canal de Panamá, y desde 1946 está bajo la responsabilidad del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI) [26].

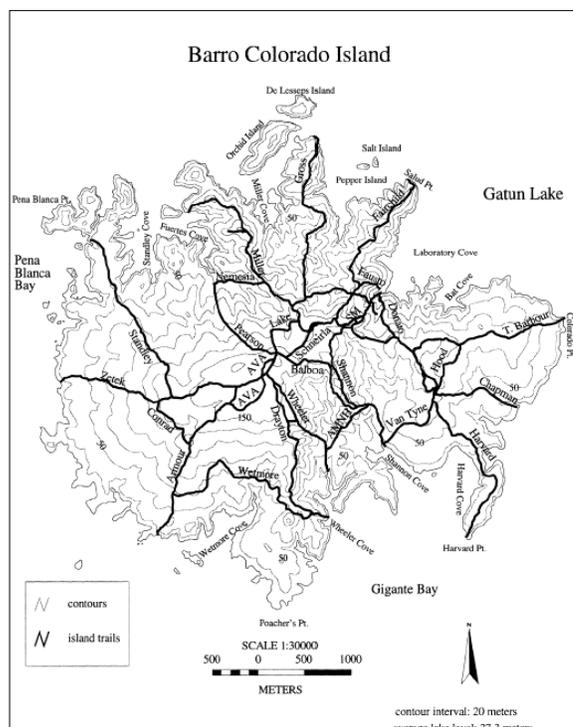


Fig. # 1. Mapa topográfico de Isla Barro Colorado.

La isla se encuentra en el lago Gatún, en el mapa se observan los senderos y sitios de investigación que hay en la isla. Se muestra la ubicación del sitio de investigación AVA, una parcela de 6 ha que es utilizada para proyectos de investigación de cuantificación de carbono por el Instituto de Investigaciones Tropicales Smithsonian [28].

El bosque tropical de tierras bajas de BCI, fue perturbado durante los intentos de construcción del canal francés y la construcción del ferrocarril de Panamá por habitantes de estas montañas, en 1930 la mitad del bosque de BCI era bosque joven que se recuperaba de actividades de desbroce por siembra de caña de azúcar, destilería y rotación de cultivos [26,27].

Se estima que el bosque de BCI se compone de un bosque maduro entre 300-400 años y un bosque joven de alrededor de 200 años, BCI es un bosque secundario maduro. [26, 29,30].

Los suelos que cubren la isla generalmente tienen una profundidad menor de 50 cm y son ricos en arcilla, los suelos de profundidad mayor a 1 m se encuentran en las cimas planas [26]. Hay dos formaciones de rocas sedimentarias fosilíferas la formación Bohío y la formación Caimito [27].

El clima de la isla es típico de un bosque tropical de tierras bajas, la temperatura promedio es de 27°C, la temporada lluviosa se extiende de mayo a diciembre y durante la temporada seca de mediados de diciembre a abril, los vientos alisios prevén tormentas convectivas de esta manera dictando los ritmos estacionales. La precipitación media anual es de 2642 (± 566) mm [27,31].

Flujo de CO₂ en suelo

En abril de 2016 se realizó una campaña de instalación del sistema automatizado de flujo de gas (LI-8100A, LI-COR Biosciences), que mide continuamente flujos de CO₂ en suelos a largo plazo. Este sistema instalado consiste en cámaras cerradas dinámicas automatizadas, un multiplexor y un analizador de gas por infrarrojos de paso cerrado.

Previamente cuatro collares de PVC fueron colocados en los sitios escogidos para las mediciones, enterrados a poca profundidad. Las cámaras se instalan sobre estos collares que tienen un diámetro exterior de 20 cm y están ubicados en los vértices de un cuadrado de 20 × 20 m centrados radial a una torre microclimática, donde hay disponibilidad de red eléctrica; las mediciones de flujo de CO₂ se toman cada segundo durante 2 minutos después de que la cámara cierra. Se realiza una prepurga de 30 segundos y postpurga de 45 segundos para asegurar que el sistema se limpie entre cada medición [25,31].

Durante una medición, solo una pequeña porción del aire de la cámara se bombea al analizador de gas por infrarrojo para determinar la concentración de CO₂. El sistema no usa un ventilador de mezcla, lo que evita perturbaciones artificiales de presión en la cámara [25].

El software del sistema calcula los resultados del flujo de CO₂ según la tasa de cambio en la concentración del gas con el tiempo dentro de la cámara y otros parámetros, realiza un ajuste por regresión utilizando según el caso una ecuación exponencial o lineal en base a R² [25]. Para este estudio se consideran todos los datos registrados a excepción de los datos obtenidos por la cámara 4 ya que sufrió un golpe brusco por caída de una rama.

Temperatura y humedad del suelo

Los datos de temperatura y humedad del suelo fueron compartidos por un grupo de investigadores del STRI que registraron mediciones en el sitio de estudio AVA cerca de la torre microclimática los datos disponibles comprenden entre abril a agosto de 2016. A continuación se detalla el procedimiento empleado por este equipo del STRI.

En Enero de 2016, dos termistores de suelo (Modelo 107, Campbell Scientific) de 10.4 cm de longitud fueron instalados permanentemente y los datos registrados con un (CR1000, Campbell Scientific) para intervalos de 5 minutos.

La humedad del suelo fue monitoreada por tres reflectómetros en el dominio del tiempo (TDR, Campbell Scientific, CS616) insertados verticalmente en el suelo en proximidad del sistema de cámaras automatizadas [31].

Se recogieron muestras de suelo entre 0 y 15 cm para diversas condiciones de humedad del suelo con el propósito de calibrar los TDR con las mediciones gravimétricas. La densidad

aparente del suelo fue de 0,75 g/cm³, esto se hizo recolectando suelo a través de un cilindro metálico de 10,6 cm de diámetro y 15 cm de altura. Este valor se usó para transformar mediciones gravimétricas de masa a contenido volumétrica de agua en suelo [31].

III. RESULTADOS

Período abril 2016 - agosto 2017

Flujo de CO₂ en suelo

Los resultados presentados en la Fig. #2, comprenden el periodo de abril de 2016 a agosto de 2017. Las condiciones adversas de la humedad, la temperatura y las eventualidades del clima a las que son sometidas estas cámaras para medición de flujo de CO₂, han ocasionado que las mediciones hayan sido interrumpidas en varias ocasiones. En la Fig. #2, se muestran los flujos de CO₂ de las 4 cámaras instaladas en el sitio de estudio. La cámara 4, registró valores muy dispersos en comparación con del resto de los valores registrados por las otras tres cámaras.

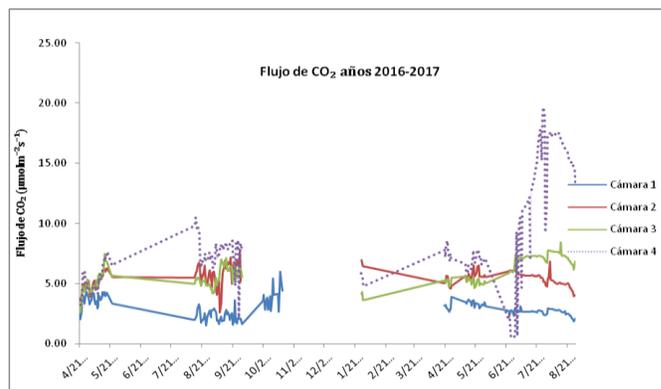


Fig. # 2. Comportamiento estacional del flujo de CO₂ El gráfico muestra para el grupo de cuatro cámaras dinámicas cerradas, ubicadas en la parcela AVA, los datos medidos desde abril de 2016 a agosto de 2017.

En el período de medición hay meses en los que no hubo registro de datos, como se observa en el gráfico, los espacios en blanco y las líneas rectas entre las oscilaciones de las mediciones. Los datos de la cámara 4, no fueron tomados en cuenta.

La cámara 1, como se puede observar en la Fig. #2, ha registrado valores inferiores que el resto de las cámaras, presentando una media de 2.92 μmol/m²s, un registro máximo de 5.98 μmol/m²s y un registro mínimo de 1.53 μmol/m²s. La heterogeneidad del suelo y la distribución de las raíces podrían ser la respuesta a estos comportamientos.

Las cámaras 2 y 3 presentan tendencias muy parecidas en cuanto a los valores registrados, la media de la cámara 2 fue de 5.48 μmol/m²s con un valor máximo registrado de 7.71 μmol/m²s y un registro mínimo de 2.59 μmol/m²s.

En la cámara 3, la media fue de 5.95 μmol/m²s con un registro máximo de 8.40 μmol/m²s y un registro mínimo de 2.61 μmol/m²s.

La cámara 4, presenta un error en el sensor interno de humedad, por lo que los datos no van a ser tomados en cuenta. Las cámaras 1, 2 y 3 presentan una media muestral de 4.67 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, un máximo muestral de 8.40 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ y un mínimo muestral de 1.53 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. La desviación estándar entre los datos registrados por las cámaras 1, 2 y 3 es de 1.8 y el coeficiente de variación de 37.56 %.

Periodo abril 2016 - agosto 2016
Flujo de CO₂ en suelo

El análisis de los datos, se realizó con las mediciones de humedad del suelo y temperatura del suelo para el período abril-agosto 2016. El flujo de CO₂ en suelo durante los meses de junio y julio no se registraron datos.

Los datos que se tienen son de los meses de abril, mayo y agosto de 2016. Para estos meses la media muestral fue de 4.47 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, un registro máximo muestral de 7.44 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ y un registro mínimo muestral de 1.53 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. La desviación estándar entre los datos registrados por las cámaras 1, 2 y 3 fue de 1.18.

Humedad del suelo

La humedad del suelo se calculó con uno de los TDR, el # 3, enterrado a 100 cm de profundidad, y con el ajuste por medio de la ecuación polinomial, se obtuvieron los resultados presentados en la Fig. # 3.

A medida que la temporada lluviosa fue progresando, el contenido de agua en suelo fue aumentando. La media fue de 0.40 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, el valor máximo registrado fue de 0.79 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ y el valor mínimo registrado fue de 0.25 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, la desviación estándar de 0.08 y un coeficiente de variación de 20.66%.

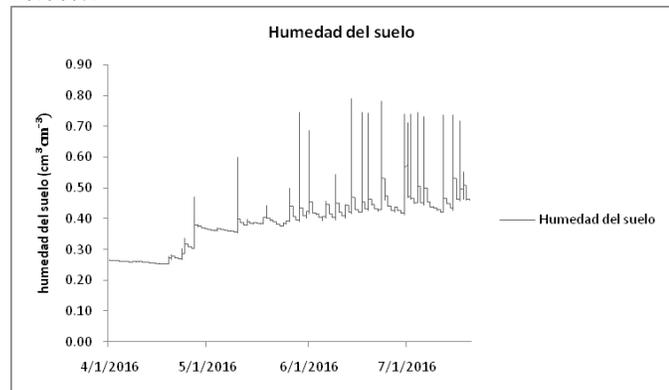


Fig. # 3. Humedad del suelo. Los registros presentados de abril a julio de 2016, tomados del TDR a 100 cm de profundidad en el sitio de estudio cerca de las cámaras dinámicas.

Temperatura del suelo

La temperatura en el suelo presentó variaciones diurnas y nocturnas, como se puede observar en la Fig. #4. En la medida

en que el invierno se fue desarrollando, las temperaturas registradas empezaron a disminuir, producto del incremento en la precipitación y la disminución de días soleados.

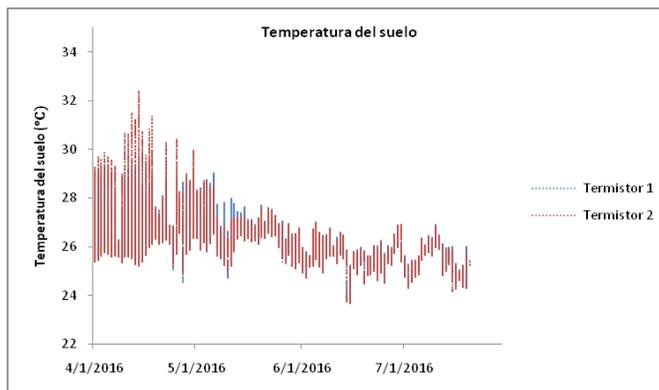


Fig. # 4. Temperatura del suelo. La temperatura fue registrada por dos termistores instalados cerca de las cámaras dinámicas. La temperatura cambia del día a la noche unos 3°C, registrándose las temperaturas máximas en los meses de temporada seca.

La media para el período de mediciones entre abril-agosto de 2016 fue de 26.10 °C, una temperatura máxima registrada de 29.63 °C y una temperatura mínima de 23.72 °C. El período de registro presento una desviación estándar de 0.86 y un coeficiente de variación de 3.30 %.

IV. DISCUSION Y CONCLUSIONES

La media de flujo de CO₂ en suelo fue 2.92 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ para el período total de análisis entre abril 2016 a agosto 2017.

El valor obtenido guarda relación con datos registrados por un estudio realizado en 1989, en donde el flujo fue de 3.98 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ para el día y 3.77 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ para la noche [32].

Otro estudio realizado en BCI, en donde se registró el flujo de CO₂, se observaron valores entre 0.25 a 14.57 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, concluyendo que los flujos de CO₂ dependen de la estacionalidad, humedad y temperatura, y en cuanto a la espacialidad no encontraron una diferencias significativas en los sitios de estudio seleccionados [31].

Los sitios de muestreo deben ser estadísticamente representativos para el área de estudio y así encontrar sitios en donde existan correlaciones entre las variables ambientales y el flujo de CO₂ y se pueda llegar a conclusiones con precisión.

La heterogeneidad del suelo, la cantidad de raíces, micorrizas y la presencia de microorganismos en un sitio influyen en la producción de CO₂, lo que ocasiona la complejidad del estudio del flujo de CO₂.

Factores físicos como el cambio en la frecuencia la presión atmosférica producido por cambios en las velocidades del

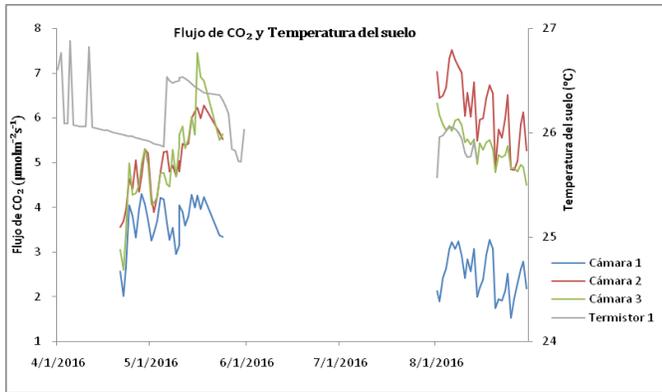


Fig. # 5. Comparación entre el comportamiento de los registros de Flujo de CO₂ y temperatura del suelo. Las cámaras 1,2 y3 registran el flujo de CO₂ en suelo y el Ter 1 la temperatura del suelo.

viento, influyen en el transporte y por lo tanto en el flujo de CO₂ hasta 50 cm de profundidad en el suelo. Así también la convección debido al gradiente de temperatura, afectan los flujos de CO₂ en el suelo [33,34].

Flujo de CO₂ y temperatura del suelo

En base a R² (ver Tabla 1), la relación entre los flujos de CO₂ medidos por la cámaras de flujo y la temperatura del suelo registrada por el termistor 1, muestra que entre abril-mayo hay correlación positiva de 0.01 a 0.35. Aunque hay correlación positiva en agosto de 0.03 a 0.34, las variaciones de la temperatura no son el único factor que influye en las fluctuaciones de los flujos de CO₂.

En la Fig. #5 se muestra la comparación entre el flujo de CO₂ y la temperatura. Se observa que la temperatura está en los máximos registros en abril-mayo, pero los flujos de CO₂ no muestran el mismo comportamiento.

La temperatura del suelo disminuye a medida que entra la temporada lluviosa. En los suelos de los bosques tropicales, la temperatura se considera que juega un rol secundario en la respiración del suelo [31] y por lo tanto en las fluctuaciones de los flujos de CO₂.

En investigaciones realizadas en laboratorio la temperatura óptima observada para la descomposición microbiana en la capa superior del suelo es 30°C, cuando la temperatura es mayor a esta se reduce la respiración microbiana [35].

Se podría explicar entonces que hay una temperatura específica para el suelo de esta parcela en BCI, en la que al alcanzarla se reduce el flujo de CO₂. Como se ve en la Fig.# 5, entre los meses de abril-mayo. No obstante cada bosque en particular depende también de un delicado balance de un sin número de condiciones como la humedad del suelo y que afectan la productividad de CO₂ de la biomasa subterránea y los microorganismos y el transporte de CO₂ a la superficie del suelo.

En la Tabla I, los valores de R² para Flujo de CO₂ vs temperatura del suelo, no explican ni son concluyentes para las variaciones de flujo de CO₂ durante el período de estudio al no ser mayor de 0.5 la correlación.

TABLA I
R² para flujo de CO₂ temperatura y humedad del suelo

Flujo de CO ₂ vs temperatura del suelo	Cámara 1 y Ter1	Cámara 2 y Ter1	Cámara 3 y Ter1
abril-mayo 2016	0.01	0.35	0.34
agosto 2016	0.34	0.28	0.03
Flujo de CO ₂ vs Humedad del suelo	Cámara 1 y TDR3	Cámara 2 y TDR3	Cámara 3 y TDR3
abril-mayo 2016	0.40	0.56	0.65
agosto 2016	0.40	0.00	0.28

Flujo de CO₂ y humedad del suelo

Al comparar los registros de humedad del suelo y los flujos de CO₂ en base a R², (ver Tabla I), se obtuvo una relación positiva entre ambas variables. Para los datos registrados en abril-mayo 2016, indicaron un R² mayor de 0.5 para dos de los sitios en donde se encuentran las cámaras de flujo de CO₂. En la medida en que aumenta la humedad del suelo el flujo de CO₂ aumenta, durante agosto esta relación, disminuye para el sitio de la cámara 2 y 3, se puede observar en la Fig. # 6.

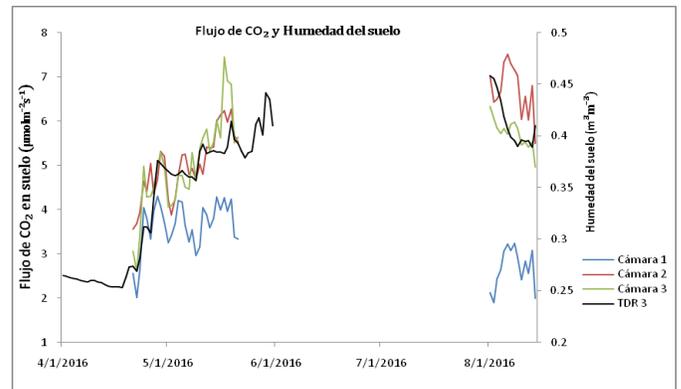


Fig. # 6. Comparación entre el comportamiento de los registros de Flujo de CO₂ y la humedad del suelo. Las cámaras 1,2 y3 registran el flujo de CO₂ en suelo y el TDR3 registra el contenido volumétrico de agua en suelo.

Los incrementos de la humedad del suelo no siempre conllevan a un aumento de la concentración y flujo de CO₂ en el suelo en BCI [31].

Para el flujo de CO₂ en suelo, también existe una condición de humedad en donde empieza a disminuir la producción y transporte de CO₂ y por lo tanto el flujo CO₂ en suelo disminuye.

El aumento del flujo de CO₂ en suelo por humedad del suelo, ocurre a principios de la temporada lluviosa, mientras que cuando la temporada lluviosa está establecida, la humedad del suelo aumenta y disminuye el flujo de CO₂ en suelo.

La producción y transporte de CO₂ en suelo involucra un balance delicado y complejo, regido por los factores físicos del suelo y los factores biológicos ante la humedad del suelo.

CONCLUSIÓN

Para el período abril 2016-agosto 2017, las cámaras 1, 2 y 3 presentaron una media de 4.67 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, un máximo de 8.40 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ y un mínimo de 1.53 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. La desviación estándar entre los datos registrados por las cámaras 1, 2 y 3 fue de 1.8 y el coeficiente de variación de 37.56 %.

Para el período abril 2016-agosto 2016, los datos para el flujo de CO₂ en suelo, registrados durante los meses de abril, mayo y agosto de 2016, mostraron una media de 4.47 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, un máximo de 7.44 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ y un mínimo de 1.53 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. Para la temperatura del suelo la media fue de 26.10 °C y para la humedad del suelo la media fue de 0.40 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$.

Las correlaciones entre los flujos de CO₂ en suelo, la temperatura y humedad del suelo, fueron positivas. Siendo de mayor influencia para el sitio de estudio la humedad del suelo.

Los flujos de CO₂ en suelo de un bosque tropical, requieren de un monitoreo continuo y a largo plazo para identificar las complejas relaciones con los distintos factores que influyen a este flujo. La implementación de los factores más relevantes para el flujo de CO₂ en suelo en las modelaciones, permitirá obtener respuestas más certeras y confiables.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al personal del CIHH de la Universidad Tecnológica de Panamá por la ayuda brindada, al Dr. M. Detto por los datos compartidos y a la Secretaria Nacional de Ciencias y Tecnología por el apoyo económico al proyecto INF10-025.

REFERENCIAS

[1] United Nations, Protocolo de Kioto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático, 1998.

[2] Van der Werf G., Morton D., DeFries R., Oliver J., Kasibhatla P., Jackson R., Collatz G. y Randerson J., CO₂ emissions from forest loss, Nature Geoscienc, Mcmillan Publishers Limited, Pág.: 737-738, 2009.

[3] Baccini A., et al, Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon density maps. Nature Climate Change. Pág.: 182-185, 2012.

[4] ONU-REDD, La superficie boscosa y la tasa de reforestación en Panamá, 2015.

[5] González D., Mapa Petaquilla, La Prensa, 2009.

[6] Bilbao G., La conquista del Atlántico, <https://pulitzercenter.shorthand.com/laconquista/index.html>, 2017.

[7] Bilbao G., Un país en venta, http://impresa.prensa.com/panorama/pais-venta_0_4917258357.html, 2017.

[8] Arcia O., Costoso daño en Petaquilla, www.prensa.com/sociedad/costodano-0-4233326818.html, 2015.

[9] Benfield, et al, Temporal mangroves dynamics in relation to coastal development in Pacific Panama, 2005.

[10] Granek, Ruttenberg, Changes in biotic and abiotic processes following mangrove clearing.

[11] Outterson, Evaluating the progress of a mangrove reforestation project on Isla Galeta, Colón, 2014.

[12] UN REDD, Programa conjunto de las Naciones Unidas para la reducción de emisiones provenientes de deforestación y de degradación de los bosques de Panamá, 2016.

[13] Ley No. 361, por la cual se aprueba el Acuerdo de París, Panamá, 2016.

[14] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change Working group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the IPCC, Pág.: 122, 2014.

[15] FAO, Actividades de restauración de los bosques y paisajes en el contexto del cambio climático en la región, 2017.

[16] MIAMBIENTE, Mapa de cobertura y uso de la tierra, Informe final de Mapa de cobertura y uso de la tierra 2012, Panamá, 2017.

[17] Newmann-Cosel L., Zimmermann B., Hall J., Van Breugel M, Soil carbon dynamics under young tropical secondary forests on former pastures- A case study from Panama, Forest Ecology and Management. Elsevier, Pág.: 1625-1633, 2010.

[18] Law R., Interpreting, measuring and modelling soil respiration, 2005.

[19] Fang, Moncrieff, A model for soil CO₂ production and transport 1: Model development, Agricultural and Forest Meteorology, Pág.:225-236, 1999.

[20] Eswaran, et al, Organic carbon in soils of the world, Soil Sci. Soc. Am. J. 57 Pág.:192-194, 1993.

[21] Scharlemann et al., Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool, Future Science, Pág.: 81-91, 2014.

[22] Grimm R., Behrens T., Märker M., Elsenbeer H., Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island – digital soil mapping using random forest analysis, Geoderma, Elsevier, Pág.: 102-113, 2008.

[23] Davidson E., Trumbore S., Gas diffusivity and production of CO₂ in deep soils of eastern Amazon, Tellus, 1995.

[24] Fang C., Moncrieff J., The dependence of soil CO₂ efflux on temperature, Soil Biology & Biochemistry 33, Pág.:155-165,2001.

[25] LI-8100A Automated Soil Gas Flux System, A Rugged System for Dependable Results, LI-COR® Biosciences.

[26] Leigh E., et al, The ecology of a tropical forest seasonal rhythms and long-term changes, Publicado por Smithsonian, 1996.

[27] Woodring W. Manuscrito, Geology of Barro Colorado Island, Canal Zone, publicado por Smithsonian Institution, 1958.

[28] Leigh E., Tropical forest ecology, a view from Barro Colorado Island, Oxford University Press, 1999.

[29] Yavitt, et al, The canopy gap regime in a secondary neotropical forest in Panama, *Journal of Tropical Ecology*, Pág.: 391-402, 1995.

[30] Mascaró, et al, Controls over aboveground forest carbon density on Barro Colorado Island, Panama, 2011.

[31] Rubio, Detto, Spatio temporal variability of soil respiration in a seasonal tropical forest, Ecology and Evolution, Wiley, 2017.

[32] Kursar T., Evaluation of soil respiration and soil CO₂ concentration in a lowland moist forest in Panama. Plant and Soil. Kluwer Academic Publishers. Pág: 21-29, 1989.

[33] Takle, et al, Influence of high-frequency ambient pressure pumping on carbon dioxide efflux from soil, Agricultural and Forest Meteorology, Science Direct, Elsevier, Pág.: 193-206, 2004.

[34] Rey, Mind the gap: non-biological processes contributing to soil CO₂ efflux, Global Change Biology Pág.: 1752-1761, 2015.

[35] Hashimoto S., Komatsu H., Relationships between soil CO₂ concentration and CO₂ production, temperature, water content, and gas diffusivity: implications for field studies through sensitivity analyses, J For Res 11, Pág.: 41-50, 2006.