

DISEÑO DE CALIBRACIÓN PARA CUANTIFICAR EMISIONES DE CO₂ (RESPIRACIÓN DEL SUELO) DURANTE INTERVALOS DIURNOS

CALIBRATION DESIGN TO QUANTIFY CO₂ EMISSIONS (SOIL RESPIRATION) DURING DAYTIME INTERVALS

Leticia Citlaly **López-Teloxa**¹, Alejandro Ismael **Monterroso-Rivas**², Jesús David **Gómez-Díaz**²

¹Fitotecnia, ²Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo Estado de México. (citlaly_lo@hotmail.com).

RESUMEN

Las emisiones del suelo son el segundo flujo mayor de bióxido de carbono (CO₂) de la superficie terrestre a la atmósfera. Ese flujo depende de los organismos del suelo y las raíces de las plantas y es función de la temperatura, humedad y textura del suelo. El objetivo del presente estudio fue diseñar un método de cuantificación de emisiones de CO₂ y validarlo mediante un modelo de regresión que permita el desarrollo de un protocolo experimental mejor para el uso de una cámara de medición de flujos. La emisión del suelo se midió en un área cubierta por *Cynodon dactylon* (L.) Pers. (Bermuda) con una cámara dinámica cerrada LICOR LI-8100A, integrada con un analizador infrarrojo de gases. También se determinaron la temperatura y humedad del suelo con sensores integrados, en cuatro diferentes intervalos diurnos entre toma de muestras. Los intervalos se estudiaron para buscar la mejor estimación de emisiones de CO₂, en condiciones ambientales diferentes y dos tiempos de observación: la primera de 240 s cada 5 min, durante 8 h. La segunda fue de 90 s con dos repeticiones cada 30, 60 y 120 min durante 12 h. Los resultados principales mostraron que existieron diferencias significativas en las muestras evaluadas a las 8:00 y 18:00 h; en otros horarios la respiración del suelo fue relativamente homogénea. El intervalo de medición ideal que describe la fluctuación espacial del CO₂ a lo largo del día y entre periodos diferentes de radiación solar fue de 120 min. La validación del modelo de regresión lineal determinó el 50% de la variación; y la restante se podría explicar por otras variables del desarrollo del pasto y las propiedades fisicoquímicas del suelo. El modelo presentó un error de $\pm 2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, y es importante señalar que se elaboró bajo condiciones de humedad de 0.42 a 0.53 m³ m⁻³ y temperatura de 17.6 a 30 °C.

ABSTRACT

Soil emissions account for the second largest flux of carbon dioxide (CO₂) from the Earth's surface to the atmosphere. This flux depends on the soil organisms and the plants roots and is based on soil temperature, soil moisture and texture. The aim of the present study was to design a method to quantify CO₂ emissions and to validate it using a regression model that helps develop an improved experimental model for the use of a flux measurement chamber. Soil emissions were measured in an area covered with *Cynodon dactylon* (L.) Pers. (Bermuda) with a closed LICOR LI-8100A dynamic chamber equipped with an infrared gas analyzer. Soil temperature and moisture were also determined using built-in sensors, in four different daytime intervals between sample collections. The intervals were studied to find the best estimation of CO₂ emissions, under different environmental conditions and two observation times: the first one lasted 240 s every 5 min, for 8 h; the second one lasted 90 s with two repetitions every 30, 60 and 120 min for 12 h. The main results showed that there were significant differences in samples evaluated at 8:00 and 18:00; at other times, soil respiration was relatively homogenous. The ideal measurement interval that describes the spatial fluctuation of CO₂ throughout the day and between different periods of solar radiation was 120 min. The validation of the linear regression model determined 50% of the variation, and the rest could be explained with other variables such as grass development and soil physicochemical properties. The model presented an error of $\pm 2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, and it is worth mentioning that it was performed under soil moisture conditions between 0.42 and 0.53 m³ m⁻³ and a soil temperature between 17.6 and 30 °C.

Key words: closed dynamic chamber, soil respiration, gas analyzer, regression model, sun radiation.

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.

Recibido: septiembre, 2019. Aprobado: mayo, 2020.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 54: 731-745. 2020.

Palabras clave: cámara dinámica cerrada, respiración del suelo, analizador de gas, modelo de regresión, radiación solar.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un importante reservorio de carbono, pero también es emisor significativo de CO₂. Las emisiones de CO₂ o respiración del suelo (RS) es un componente principal del ciclo global de carbono (Ryan *et al.*, 2018) porque resulta de los procesos biológicos de raíces y organismos edáficos, así como también de la descomposición de la materia orgánica. Según Ru *et al.* (2018) se le considera el segundo mayor flujo de carbono entre la tierra y la atmósfera. Sin embargo, los seres humanos continúan con la alteración de los ecosistemas e incrementan la emisión de gases de efecto invernadero provenientes del suelo (Gómez *et al.*, 2017). Las emisiones se acentúan por malas prácticas de manejo, como deforestación, quema de biomasa, drenaje en humedales, labranza y eliminación de residuos de cultivos (Chi *et al.*, 2020). Por lo tanto, es importante determinar las emisiones desde el suelo, y también cuáles son las prácticas y los usos de suelo que más aportan CO₂ asociado con la respiración.

La determinación cuantitativa de las emisiones de CO₂ derivadas del suelo puede contribuir a desarrollar herramientas de mitigación mejores; además, provee información detallada para fomentar cobeneficios entre estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, y que tendrán como base el manejo y la conservación del suelo. Lo anterior tiene la finalidad de reducir las emisiones de bióxido de carbono a la atmósfera (Serran *et al.*, 2017) y lograr adaptaciones al cambio climático.

Para la determinación de las emisiones de CO₂ provenientes del suelo existen diversos métodos, aunque la técnica más usada para determinar las tasas de CO₂ es cuantificar un sistema de cámaras. Hasta ahora hay tres tipos: cámaras estáticas cerradas, cámaras dinámicas cerradas y cámaras dinámicas abiertas (Cueva *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 2011). Los sistemas de cámaras dinámicas abiertas determinan la tasa de respiración al medir la concentración atmosférica de CO₂ y la del interior de la cámara. En las cámaras cerradas, ya sean dinámicas o estáticas, el flujo de CO₂ se determina por el aumento en la concentración en la cámara, la cual se coloca en un área conocida por un período de tiempo determinado. Las cámaras

INTRODUCTION

Soil is an important carbon reservoir, but it is also a significant source of CO₂. CO₂ emissions, or soil respiration (SR) is a main component of the global carbon cycle (Ryan *et al.*, 2018), since it is a result of all biological processes of roots and soil organisms, as well as of the decomposition of organic matter. According to Ru *et al.* (2018), it is considered the second largest carbon flux between Earth and the atmosphere. However, humans continue to degrade ecosystems and increase the greenhouse gases emission from the soil (Gómez *et al.*, 2017). These emissions are increased by inadequate management practices such as deforestation, burning biomass, drain wetlands, tilling and eliminating crop residues (Chi *et al.*, 2020). Therefore, it is important to determine soil emissions, but also the practices and soil uses that contribute the most respiration-related CO₂ emissions.

The quantitative determination of soil CO₂ emissions may contribute to the development of better mitigation tools. It also provides detailed information to promote co-benefits between strategies for the mitigation of, and adaptation to, climate change, and will be based on soil management and conservation. The purpose of this is to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere (Serran *et al.*, 2017) and achieve adaptations to climate change.

There are several methods to determine CO₂ emissions from the soil, although the most widely used technique to determine CO₂ rates is by quantifying a system of chambers. Nowadays, there are three types: closed static chambers, closed dynamic chambers and open dynamic chambers (Cueva *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 2011). The open dynamic chamber systems determine the respiration rate when measuring the atmospheric concentration of CO₂, as well as inside the chamber. In closed chambers, whether dynamic or static, the CO₂ flux is determined by the increase in concentration inside the chamber, which is placed in a known area for a specific time period. Closed dynamic chambers estimate CO₂ using an analyzer of gases in the infrared spectrum, while static ones do the same by chemical absorption (Bain *et al.*, 2005). Bradford and Ryan (2008) suggested using closed dynamic chambers due to their cost efficiency, because they are portable and they produce accurate results. Additionally, the variations of CO₂ emissions

cerradas dinámicas estiman el CO₂ por medio de un analizador de gases en el espectro infrarrojo, mientras que la estática lo hace por absorción química (Bain *et al.*, 2005). Bradford y Ryan (2008) sugirieron utilizar las cámaras dinámicas cerradas por su costo eficientes, portátiles, y generar resultados certeros. Además, las variaciones que se obtienen en las emisiones de CO₂ se deben con frecuencia a las condiciones ambientales, la composición y abundancia de la vegetación, o la calidad del sustrato o del suelo; pero no a errores en el equipo.

La emisión de CO₂ en suelos de California, en un ecosistema de sabana con elementos leñosos y herbáceas es 2.29 μmol de CO₂ m⁻² s⁻¹ como componente de respiración, y de 1.40 μmol de CO₂ m⁻² s⁻¹ en suelos desprovistos de cobertura vegetal en temporada húmeda; estos valores se atribuyen sobre todo a la respiración de las raíces. En cambio, las praderas de humedales alpinos no degradados de China presentaron un flujo de 4.26 μmol de CO₂ m⁻² s⁻¹ en el inicio de la temporada de crecimiento, y a mitad de la temporada, 7.86 μmol de CO₂ m⁻² s⁻¹; pero los mismos sistemas con degradación severa emitieron 48.4% menos en la temporada de crecimiento y 62.6% menos a la mitad de esta (Li *et al.*, 2019). En México, los pastizales presentan tasas altas de emisión de CO₂ de 3.5 a 5.0 μmol de CO₂ m⁻² s⁻¹, durante la mañana y la tarde, respectivamente. En contraste, en sorgo las tasas más bajas de respiración del suelo son 1.9 y 2.5 μmol de CO₂ m⁻² s⁻¹ en los mismos periodos de tiempo que el pastizal, de acuerdo con Cantú *et al.* (2010).

Los flujos varían con el ecosistema, la época del año y las condiciones del suelo, en especial temperatura y humedad del suelo (Dowhower *et al.*, 2020). Por eso, es importante diseñar y establecer la metodología adecuada para la obtención de resultados certeros. La hipótesis fue que sí existe diferencia en las emisiones de CO₂ a lo largo del día y existe un intervalo de tiempo ideal entre muestreos que produce resultados certeros sobre la fluctuación temporal del CO₂ del suelo. Por lo tanto, el objetivo del estudio fue diseñar un método de cuantificación de emisiones de CO₂ y validar mediante un modelo de regresión el desarrollo de un protocolo experimental mejor para el uso de una cámara de medición de flujos.

obtained are frequently due to weather conditions, plant composition and abundance, or the quality of the soil substrate, but not to errors in the equipment.

Carbon dioxide emissions from California soils, in a savannah ecosystem with woody and herbaceous elements is 2.29 μmol of CO₂ m⁻² s⁻¹ as a respiration component, and 1.40 μmol of CO₂ m⁻² s⁻¹ in soils without plant coverage in rainy season; these values are mainly attributed to root respiration. The undegraded alpine wetland prairies in China presented a flux of 4.26 μmol of CO₂ m⁻² s⁻¹ at the start of the growing season, and 7.86 μmol of CO₂ m⁻² s⁻¹ in the middle of the season, although the same systems with severely degraded systems emitted 48.4% less in the growing season, and 62.6% less in the middle of the same season (Li *et al.*, 2019). In Mexico, grasslands present high CO₂ emission rates between 3.5 and 5.0 μmol of CO₂ m⁻² s⁻¹, in the morning and afternoon, respectively. By contrast, in sorghum, the lowest respiration rates are 1.9 and 2.5 μmol of CO₂ m⁻² s⁻¹ in the same periods of time as the grasslands, according to Cantú *et al.* (2010).

Fluxes vary with the ecosystem, the time of year and the soil conditions, particularly soil temperature and moisture (Dowhower *et al.*, 2020). Due to this, it is important to design and establish the appropriate methodology to obtain accurate results. The hypothesis was that there are differences in CO₂ emissions throughout the day, and there is an ideal time interval between sample records, which produces accurate results on the time fluctuation of soil CO₂. Therefore, the aim of this study was to design a method to quantify soil CO₂ emissions and, using a regression model, validate the development of a better experimental protocol for the use of a flux measurement chamber.

MATERIALS AND METHODS

Study site description

The chosen area for research and equipment calibration was a land covered with common *Cynodon dactylon* (L.) Pers. (Bermuda) grass at Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Mexico with an altitude of 2250 m, temperate sub-humid climate with a mean annual temperature of 17.2 °C and mean

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio

El área elegida para la calibración del equipo y la investigación fue una cubierta de pasto común *Cynodon dactylon* (L.) Pers. (Bermuda) en la Universidad Autónoma Chapingo, municipio de Texcoco de Mora, México. A 2250 m de altitud, clima predominante templado subhúmedo con temperatura media anual de 17.2 °C y precipitación media de 618.3 mm, con distribución de lluvias en verano. Esta cobertura se seleccionó de acuerdo con Dunne y Leopold (1978) para la cuantificación de la evapotranspiración potencial (ETP). La especie de pasto seleccionada es la más usada en campos deportivos, y presenta algunas ventajas como tolerancia a temperaturas bajas, recuperación rápida después de un pisoteo o corte, resistencia adecuada a enfermedades y adaptación a condiciones de drenaje variables (Laurencena *et al.*, 2009).

Registros meteorológicos diarios se obtuvieron con una estación meteorológica portátil (La Crosse Technology Mod. C86234) colocada a 1.5 m de altura y a 1 m de distancia de la cámara de medición y toma de muestras. Además, los datos se corroboraron con la estación meteorológica automática Chapingo (MX25) operada por el Organismo de Cuenca y Aguas del Valle de México (OCAVM) (<https://smn.cna.gob.mx/es/estaciones-meteorologicas-automaticas-3>).

Emisiones de CO₂ provenientes del suelo

Cuatro intervalos entre toma de muestras se estudiaron para buscar el mejor estimador de emisiones de CO₂ y hacer la toma de muestras más eficiente en campo, para obtener resultados confiables en condiciones ambientales diferentes.

Las emisiones de CO₂ del suelo se midieron con una cámara dinámica cerrada (Bradford y Ryan, 2008; LI-COR Biosciences, 2015) integrada con un analizador infrarrojo de gases (IRGA) y una cámara de volumen conocido colocada en el suelo (Modelo 8100-104). La ventaja de la cámara es que realiza mediciones instantáneas de la concentración de CO₂, permite mayor rapidez, agilidad al tomar réplicas y reduce la probabilidad de error (Cueva *et al.*, 2012; Davidson *et al.*, 2002). En conjunto miden la concentración de CO₂ dentro de la cámara y determinan el flujo de salida mediante el ajuste de la cámara a un collar de cloruro de polivinilo.

Además, se midieron la temperatura y humedad del suelo con dos sensores adjuntos, p/n8150-203 Soil Temperature Probe y 8100-204 Theta Soil Moisture Probe, respectivamente. Los collares en el suelo se instalaron 12 h antes de realizar la primera medición para reducir el error asociado con esta perturbación del

annual rainfall of 618.3 mm with the summer raining season. This coverage was chosen following Dunne and Leopold (1978) report for the quantification of potential evapotranspiration (PET). The selected grass species is the most widely used in sports fields, and presents some advantages such as tolerance to low temperatures, quick recovery after treading or cutting, adequate resistance to diseases and it adapts to variable drainage conditions (Laurencena *et al.*, 2009).

Weather variables were registered daily at daytime hours using a portable weather station (La Crosse Technology Mod. C86234), placed 1.5 m above the ground and 1 m away from the measurement chamber and sample collection. In addition, the data were verified with the Chapingo automatic weather station (MX25) run by the Mexico Valley Water Basin Organism (in Spanish, OCAVM) (<https://smn.cna.gob.mx/es/estaciones-meteorologicas-automaticas-3>).

CO₂ Emissions from the soil

Four intervals between each sample collection were studied to search for the best CO₂ emission estimator and make field sample collections more efficient in order to obtain reliable results under different weather conditions.

The CO₂ emissions from the soil were measured using a closed dynamic chamber (Bradford and Ryan, 2008; LI-COR Biosciences, 2015) with a built-in Infrared Gas Analyzer (IRGA) and a known volume chamber that is placed on the soil surface (Model 8100-104). The advantage of the chamber is that it takes instant measurements of the CO₂ concentration, it provides speed, agility in replicating records and it reduces the probability of errors (Cueva *et al.*, 2012; Davidson *et al.*, 2002). Altogether, they measure the CO₂ concentration inside the chamber and determine the outflow by fitting the camera through a polyvinyl chloride collar.

Besides, soil temperature and moisture were measured with two attached sensors: p/n8150-203 Soil Temperature Probe and 8100-204 Theta Soil Moisture Probe, respectively. The collars in the soil were installed 12 h before taking the first measurement to reduce the error related to this soil disruption. Clough *et al.* (2015), Davidson *et al.* (2000) and Parkin and Venterea (2010) explained that this is required, since the soil is disrupted during collar installation, which can break roots and the pressure exerted on the base may compact the soil.

The CO₂ accumulated in the chamber was measured as CO₂ mmol mol⁻¹ of dry air, in two observation times: first was 240 s every 5 min, for 8 h, and the second lasted 90 s with two repetitions every 30, 60 and 120 min for 12 h. All measurements were programmed with 30 s of dead band, pre-purged for 60 s and post-purged for 30 s. The CO₂ flux values were calculated

suelo. Clough *et al.* (2015), Davidson *et al.* (2000) y Parkin y Venterea (2010) explicaron que esto es necesario porque se realiza una perturbación en el suelo durante el proceso de instalación del collar que puede consistir en la ruptura de raíces, y la fuerza ejercida sobre la base puede generar una compactación del suelo.

El CO₂ acumulado en la cámara se midió como CO₂ mmol mol⁻¹ de aire seco, en dos tiempos de observación: el primero de 240 s cada 5 min durante 8 h. El segundo fue de 90 s con dos repeticiones cada 30, 60 y 120 min durante 12 h. Todas las mediciones se programaron con 30 s de banda muerta, pre-purga de 60 s y pos-purga de 30 s. Los valores del flujo de CO₂ se calcularon con la siguiente ecuación y se expresaron como CO₂ μmol m⁻² s⁻¹:

$$F_c = \frac{10VP_0 \left(1 - \frac{w_0}{1000}\right) \partial C'}{RS(T_0 + 273.15) \partial t}$$

donde F_c es la tasa de flujo de CO₂ del suelo (μmol m⁻² s⁻¹), V es el volumen (cm³), P_0 es la presión inicial (kPa), W_0 es la fracción de mol de vapor de agua inicial (mmol mol⁻¹), R es la constante de gas (8.314 Pa m³ K⁻¹ mol⁻¹), S es el área de la superficie del suelo (cm²), T_0 es la temperatura inicial del aire (°C), y $\frac{\partial C'}{\partial t}$ es la tasa de cambio inicial en la fracción molar de CO₂ corregida por el agua (μmol mol⁻¹).

Diseño experimental

El diseño fue realizar dos pruebas. La primera fue buscar diferencias entre tres condiciones ambientales: 1) tiempo entre mediciones, 2) exposición al sol, y 3) hora del día, con la finalidad de seleccionar el intervalo de tiempo ideal para la cuantificación de emisiones de CO₂. La segunda prueba se realizó una vez seleccionados los intervalos de muestreos para cuantificar emisiones de CO₂, los datos se tomaron durante 7 d seguidos en cada intervalo, para obtener datos diurnos y nocturnos (cada 30 y 120 min).

Bradford y Ryan (2008) recomendaron mediciones de la respiración del suelo en intervalos cada 2 a 4 h, para caracterizar la variabilidad temporal en la emisión de CO₂ del suelo. Por lo tanto, para esta investigación el tiempo entre toma de muestras se completó con cuatro mediciones: cada 5, 30, 60 y 120 min. El sistema de la cámara permite ajustar los tiempos como sea conveniente al investigador.

De acuerdo con la primera prueba, el tiempo entre mediciones consistió en la toma de datos cada 5, 30, 60 y 120 min. Las situaciones de exposición al sol fueron dos: un área de pastos con 8 h de sol al día y sembrados desde hace aproximadamente 50 años, el cual se consideró como testigo con intervalo de me-

with the following equation and were expressed as CO₂ μmol m⁻² s⁻¹:

$$F_c = \frac{10VP_0 \left(1 - \frac{w_0}{1000}\right) \partial C'}{RS(T_0 + 273.15) \partial t}$$

where F_c is the soil CO₂ efflux rate (μmol m⁻² s⁻¹), V is the volume (cm³), P_0 is the initial pressure (kPa), w_0 is the initial water vapor mole fraction (mmol mol⁻¹), R is the gas constant (8.314 Pa m³ K⁻¹ mol⁻¹), S is soil surface area (cm²), T_0 is the initial air temperature (°C), and $\frac{\partial C'}{\partial t}$ is the initial rate of change in water-corrected CO₂ mole fraction (μmol mol⁻¹).

Experimental design

The design consisted in performing two tests, the first of which involved searching for differences between three environmental conditions: 1) time between measurements, 2) sunlight exposure, and 3) measurement hour, in order to select the ideal time interval for the quantification of CO₂ emissions. The second test was carried out once the sampling intervals for the quantifications of CO₂ emissions were selected, data were taken for 7 consecutive days in each interval to obtain data during sunlight and at night time (every 30 and 120 min).

Bradford and Ryan (2008) recommended soil respiration measurements in intervals of 2 to 4 h, to characterize the temporary variability in soil CO₂ emission. Therefore, for this field investigation, time between sample collections contained four measurements: every 5, 30, 60 and 120 min. The chamber system allows adjusting times, as required by the researcher.

According to the first test, times between measurements consisted in taking data every 5, 30, 60 and 120 min. Circumstances regarding sun exposure were two: an area of grass with 8 h of sunlight per day and planted for approximately 50 years, which was considered a control with measuring interval every 30 min (measurements at other intervals were assumed constant). And, one area with grass mostly in the shade, a maximum of 3 h of sunlight per day and planted for approximately 20 years, where measurements were taken at the 4 intervals. Regarding daytime hours, samples were grouped in three periods: morning (MA, 08:00 to 11:59 h), midday (ME, 12:00 to 15:59 h) and afternoon (TA, 14:00 to 19:59 h). Every measurement interval was performed for 8 h, data was taken with two repetitions, for a total of 280 measurements.

After analyzing the first stage, the second test was carried out on grasses with 8 h of sunlight per day for 168 h non-stop (intervals every 30 and 120 min), data were taken with two replications, for a total of 840 measurements

dición de cada 30 min (las mediciones en los otros intervalos se supusieron constantes). Y un área de pastos en su mayoría a la sombra y máximo 3 h de sol al día, sembrados desde hace aproximadamente 20 años, donde se realizaron las mediciones en los cuatro intervalos. Las muestras se agruparon en tres períodos: mañana (MA, 08:00 a 11:59), medio día (ME, 12:00 a 15:59) y tarde (TA, 14:00 a 19:59). Cada intervalo de medición se realizó durante 8 h seguidas, cada toma de datos con dos repeticiones, para un total de 280 mediciones.

Después de analizar la primera etapa, la segunda prueba se realizó en pastos con 8 h de sol al día durante 168 h continuas (intervalos cada 30 y 120 min), y cada toma de datos con dos repeticiones para un total de 840 mediciones.

Análisis estadístico

Para identificar diferencias estadísticamente significativas en los valores de CO₂ entre muestreo y periodos del día se realizó un ANDEVA. Las diferencias estadísticas entre las medias se identificaron con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), de acuerdo con Pompa y Sigala (2017). Con el modelo de efectos mixtos lineales (LMM) se probó si la temperatura ambiental, precipitación, humedad del suelo, temperatura del suelo (datos aleatorios) y horarios e intervalo de muestreo (datos fijos) tuvieron efecto significativo en las emisiones de CO₂ del suelo (Tiruvaimozhi y Sankaran, 2019). Con el modelo de regresión lineal se exploró la variabilidad para determinar el efecto de la interacción entre variables que mejor describiera el comportamiento de las emisiones de CO₂, para estudiar la relación y predecir la tasa de CO₂ liberado a la atmosfera. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software Minitab R 18.1 (Minitab Inc., 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El total de mediciones (537) se distribuyó en 243 datos cada 5 min, cada 30 min fue 210 datos, 54 datos cada 60 min, y 30 datos cada 120 min. Este total de datos analizados mostró la intensidad de emisiones, durante cinco días de junio de 2019 (Figura 1). Las emisiones de CO₂ del suelo o respiración del suelo (Serran *et al.*, 2017; Tang y Baldocchi, 2005) provienen del metabolismo microbiano, raíces y la tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo (Tang y Baldocchi, 2005). En nuestro estudio no se consideraron variaciones en las variables anteriores, ni tampoco en época del año ni otras variables reales en campo.

Las emisiones de CO₂ en los pastos fluctuaron de 3 a 20 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, y aumentaron al medio día, con

Statistical analysis

In order to identify statistically significant differences in the values of CO₂ between sampling and daytime hours, an ANOVA was carried out. The statistical differences between means were identified using Tukey's test ($p \leq 0.05$), following Pompa and Sigala (2017). With the linear mixed effect model (LMM) we tested whether ambient temperature, rainfall, soil moisture, soil temperature (random data), daytime hours and sampling intervals (fixed data) had a significant effect on the soil CO₂ emissions (Tiruvaimozhi and Sankaran, 2019). The linear regression model was used to explore the variability to determine the effects of the interaction between variables that better describe the behavior of CO₂ emissions in order to study the relation and predict the rate of CO₂ released into the atmosphere. All the statistical analyses were carried out using the software Minitab R 18.1 (Minitab Inc., 2017).

RESULTS AND DISCUSSION

The total of measurements (537) was distributed in 243 data every 5 min, every 30 min it was 210 data, 54 data every 60 min, and 30 data every 120 min. These analyzed data showed the intensity of emissions during five days in June, 2019 (Figure 1). Soil CO₂ emissions or soil respiration (Serran *et al.*, 2017; Tang and Baldocchi, 2005) come from the microbial metabolism, roots and the mineralization rate of soil organic matter (Tang and Baldocchi, 2005). Our study did not consider variations in the previous variables, in the time of year or other factual variables on the field.

CO₂ emissions in grasses fluctuated from 3 to 20 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, and increased at midday, with the highest values between 13:00 and 15:00 h, except the samples taken every 30 min in grasses under shade, which increased at 20:00 h. In all five cases, soil temperature increased during the day from 13 to 25 °C. The opposite occurred for soil moisture, which dropped in the evaluated period, with a variation interval in the data from 0.32 to 0.47 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. According to the Pearson correlation index, there was a positive correlation between CO₂ emissions and temperature, followed by a negative correlation with soil moisture (Table 1), which agrees with findings by Abdalla *et al.* (2018) and Cantú *et al.* (2010). According to Serran *et al.* (2017) and Tang and Baldocchi (2005), soil temperature and moisture explain the greater amount of variation in soil CO₂

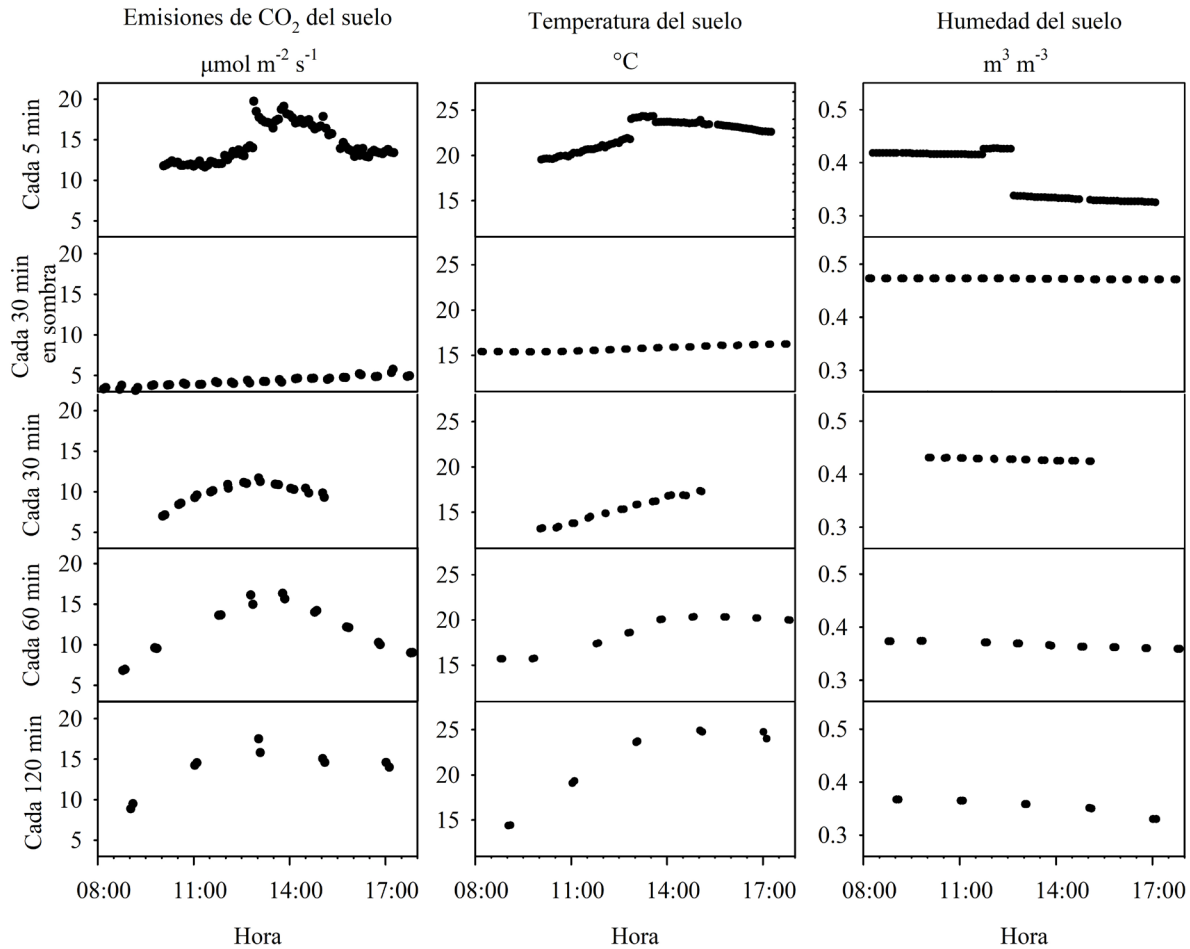


Figura 1. Emisiones de CO₂, temperatura y humedad del suelo según muestreos cada 5, 30 (luz/sombra), 60 y 120 minutos.
Figure 1. CO₂ emissions, temperature and moisture of soil in samples every 5, 30 (light/shade), 60 and 120 min.

los valores más altos entre 13:00 y 15:00, excepto el muestreo realizado en pastos bajo sombra a cada 30 min, que aumentaron hasta las 20:00 h. En los cinco casos la temperatura del suelo incrementó durante el día, de 13 a 25 °C. Caso contrario fue la humedad del suelo, la cual disminuyó en el periodo de tiempo evaluado, con un intervalo de variación en los datos de 0.32 a 0.47 m³ m⁻³. De acuerdo con el índice de correlación de Pearson hubo una correlación positiva alta entre emisión de CO₂ con la temperatura, seguida de una correlación negativa con la humedad (Cuadro 1), lo cual concuerda con lo encontrado por Abdalla *et al.* (2018) y Cantú *et al.* (2010). Según Serran *et al.* (2017) y Tang y Baldocchi (2005) la temperatura y humedad del suelo explican la cantidad mayor de variación de los flujos de CO₂ provenientes del suelo en el corto plazo. Por lo anterior, al final se registraron solo la temperatura y humedad del suelo.

flux in the short term. Due to this, in the end, only soil temperature and moisture were registered.

The results of the analysis of variance of the measurements were performed with the 3 factors of the sampling protocol to determine the variability of the soil variables with the environmental factors (sunlight exposure and measurement hour) and sample collection intervals. CO₂ emissions, soil temperature and moisture variables were significant ($p \leq 0.05$) according to the sunlight exposure, sampling and measurement hour, and their combinations.

The average values of soil CO₂, temperature and moisture according to the type of sampling and measurement hour showed that, according to the tests performed, CO₂ emissions and soil moisture showed no significant differences among sample records every 5, 60 and 120 min; however, they did

Los resultados del análisis de varianza de las mediciones se realizaron con los tres factores del protocolo de muestreo para determinar la variabilidad de las variables del suelo ante los factores ambientales (exposición al sol y periodo del día) e intervalos de muestreo. En las variables emisiones de CO₂, temperatura y humedad del suelo, hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$) de acuerdo con exposición al sol, muestreo y periodo del día, y sus combinaciones.

Los valores promedio de CO₂, temperatura y humedad del suelo según el tipo de muestreo y periodo del día mostraron que, de acuerdo con las pruebas realizadas, las emisiones de CO₂ y humedad del suelo no presentaron diferencias significativas entre tomas cada 5, 60 y 120 min; pero sí variaron en los muestreos realizados en relación con la temperatura. Los promedios de CO₂ y humedad del suelo realizados en intervalos de 30 min sí presentaron diferencias estadísticas (Figura 2).

Las intensidades de muestreo cada 5 min y 60 min son descartables (Figura 1 y Figura 2 A y B). El primer caso presenta variaciones elevadas y son datos inciertos, porque al permanecer cerrada la cámara por más tiempo, el CO₂ en su interior se almacena, cambia el gradiente de concentración de CO₂ del suelo al aire, y se genera una acumulación de vapor de agua (Welles *et al.*, 2001). El segundo intervalo no presentó diferencia estadística con los muestreos realizados cada 120 min, así como existió diferencia mayor entre el periodo de la mañana (8:00 a 11:59 h) con el medio día y la tarde (12:00 a 15:59 h y 14:00 a 19:59). Lo anterior se debe principalmente a que diferentes factores bióticos y abióticos regulan las emisiones de CO₂ provenientes del suelo; entre ellos destacan temperatura, contenido de humedad, nutrientes, tipo vegetación, actividad fotosintética o desarrollo fenológico de la planta, así como por la biomasa de raíces finas y microbiana (Cantú *et al.*, 2010; Cueva *et al.*, 2012).

Para comparar con mejor detalle los horarios de muestreo y obtener representatividad importante en las emisiones de CO₂, se realizaron dos jornadas de mediciones de 168 h cada una. Datos diurnos y nocturnos se registraron en conjunto con temperatura ambiental y precipitación, porque estos factores influyen en la dinámica de las emisiones de CO₂ del suelo (Tiruvaimozhi y Sankaran, 2019). El total de mediciones cada 30 min fue 1740 datos y cada 120 min 408 datos.

Cuadro 1. Pruebas de correlación simple entre las variables CO₂, temperatura y humedad medidas en los suelos estudiados.

Table 1. Simple correlation tests between the variables CO₂, temperature and moisture as recorded in the study.

	CO ₂	Temperatura suelo
Temperatura suelo	0.857 (0.000)	
Humedad del suelo	-0.782 (0.000)	-0.736 (0.000)

Cada prueba indica el coeficiente de correlación de Pearson y el valor de probabilidad (p). ♦ Each test indicates the Pearson correlation coefficient and the probability value (p).

vary in relation to temperature. Averages of CO₂ and soil moisture recorded every 30 min did present statistical differences (Figure 2).

The intensities of the sample record every 5 min and 60 min are negligible (Figure 1 and Figure 2 A and B). The first case presents elevated variations and are uncertain data, because keeping the chamber closed for a longer time leads to CO₂ storage inside, which changes the CO₂ concentration gradient between the soil and air, also leading to an accumulation of water vapor (Welles *et al.*, 2001). The second interval showed no statistical difference within samples every 120 min; likewise, there was a greater difference between the morning (8:00 a 11:59 h) and midday / afternoon (12:00 to 15:59 h and 14:00 to 19:59). These results are mainly due to different biotic and abiotic factors, regulating soil CO₂ emissions, and the most important are temperature, moisture content, nutrients, vegetation type, photosynthetic activity or phenological development of the plant, as well as by fine roots biomass and microbial biomass (Cantú *et al.*, 2010; Cueva *et al.*, 2012).

In order to compare sampling daytime hours in greater detail and to obtain an important representation of CO₂ emissions, we held two measurement sessions, each one lasting 168 h. Daytime and night-time data were recorded, along with environmental temperature and rainfall, since these two factors influence the dynamics of soil CO₂ emission (Tiruvaimozhi and Sankaran, 2019). Total of measurements every 30 min was 1740 data, and every 120 min 408 recorded data.

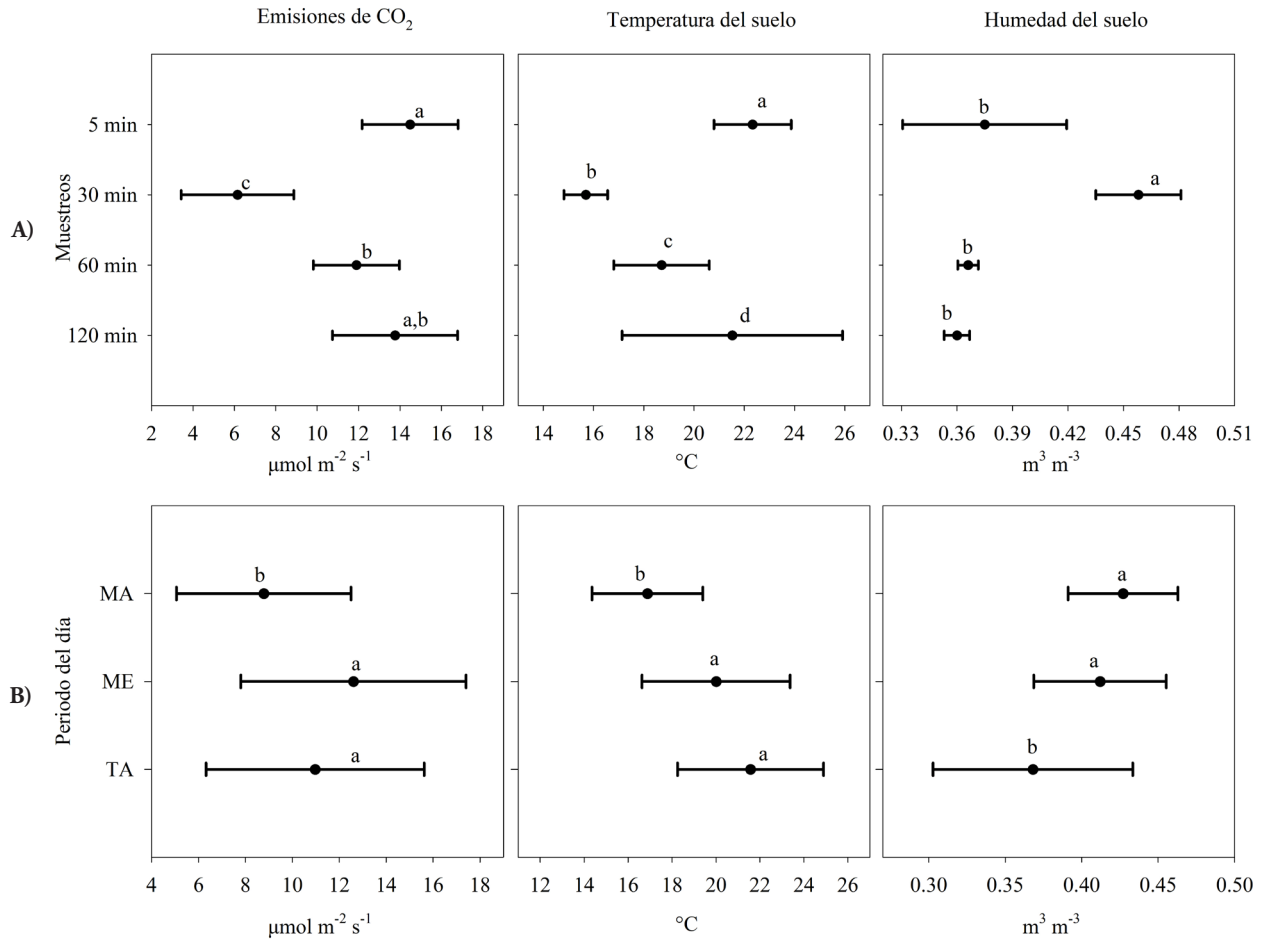


Figura 2. Promedio de emisiones de CO₂, así como temperatura y humedad del suelo. A) muestreos; B) periodo del día: MA = mañana, ME = medio día, y TA = tarde. Las letras a, b y c indican diferencias significativas (Tukey; $p \leq 0.05$).

Figure 2. Average soil CO₂ emissions, as well as temperature and moisture. A) measurement hour; B) period of the day: MA: morning; ME: midday; TA: evening. Letters a, b and c indicate significant differences (Tukey; $p \leq 0.05$).

El total de datos analizados constituye una intensidad de muestreo de 2148 datos, registrados durante 14 d en junio (verano de 2019). Las emisiones de CO₂ y sus variaciones durante 8 d de muestreo se compararon con la temperatura ambiental y del suelo; también con humedad del suelo y precipitación, en intervalos de medición de 30 min (Figura 3) y 120 min (Figura 4). Las mediciones se realizaron con eventos de lluvia porque, según Murcia y Ochoa (2008), en periodos secos las emisiones nocturnas tienden a ser más altas debido a la evaporación que favorece el flujo mayor de CO₂ a la atmósfera.

El modelo lineal mixto comprueba que las emisiones de CO₂ tienen relación mayor con los horarios ($p \leq 0.05$) mientras que por intervalos de muestreo

Data analyzed constitutes a sample density of 2148 data, registered throughout 14 d in June (summer of 2019). The CO₂ emissions and their variations for 8 d of sample collection were compared with environmental and soil temperatures, as well as with soil moisture and rainfall, in measurement intervals every 30 min (Figure 3) and 120 min (Figure 4). The measurements were recorded with every rainfall event because, according to Murcia and Ochoa (2008), in dry periods, night-time emissions tend to be higher due to evaporation, which favors a greater CO₂ flux into the atmosphere.

The mixed linear model proves that the CO₂ emissions have a higher relation with daytime hours ($p \leq 0.05$), whereas by sampling intervals, differences

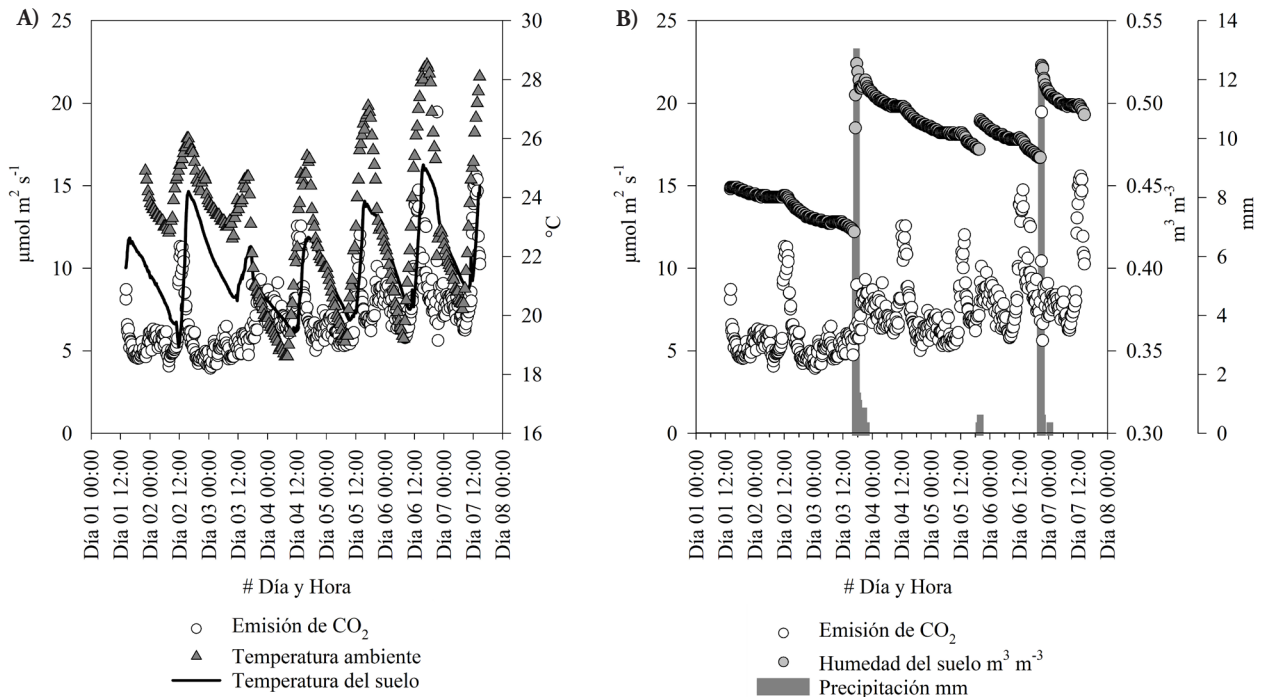


Figura 3. Emisiones de CO₂ en intervalos de 30 min comparado con A) temperatura ambiental y del suelo, B) humedad del suelo y precipitación.

Figure 3. CO₂ emissions in 30 min intervals compared to A) environmental and soil temperatures, B) soil moisture and rainfall.

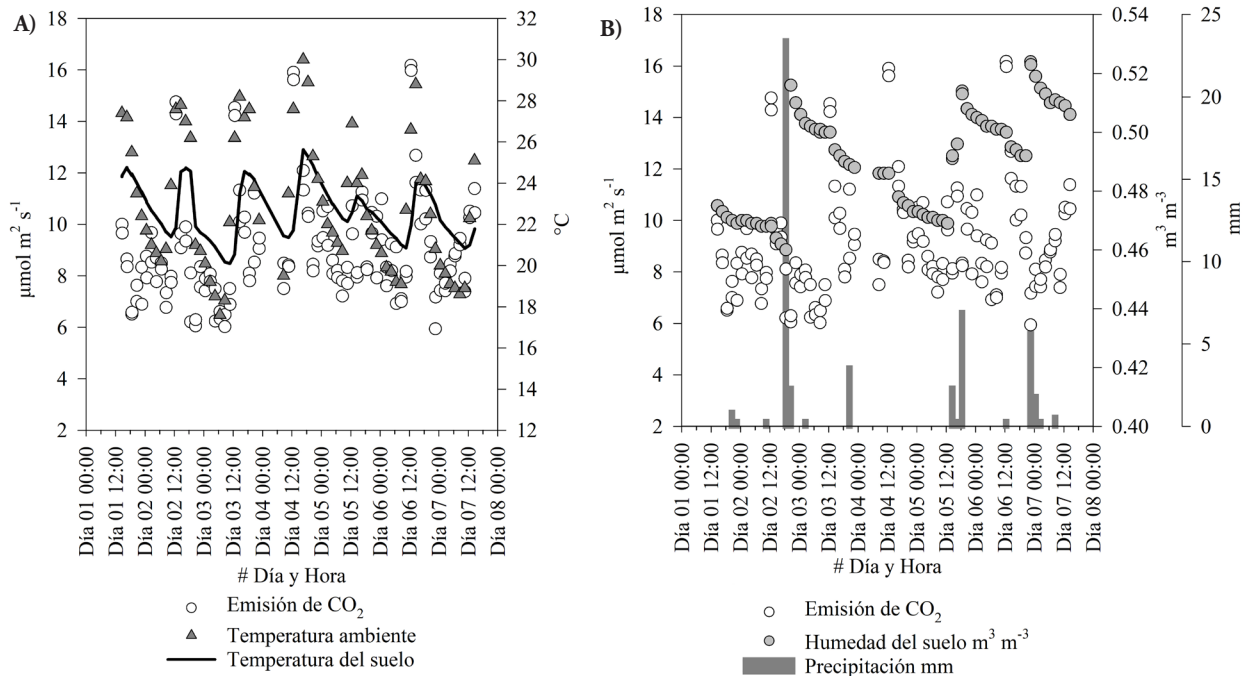


Figura 4. Emisiones de CO₂ en intervalos de 120 min comparado con A) temperatura ambiental y del suelo, B) humedad del suelo y precipitación.

Figure 4. CO₂ emissions in 120 min intervals compared to: A) environmental and soil temperatures, B) soil moisture and rainfall.

las diferencias no son significativas ($p > 0.05$). Sin embargo, presenta un ajuste mejor (Figura 3) en intervalos cada 120 min (R^2 ajustada = 97.48%) y ajuste menor (Figura 4) en intervalos de 30 min (R^2 ajustada=93.20%). Hay una asociación estadísticamente significativa con temperatura ambiental ($p=0.00$), precipitación ($p=0.01$) y humedad de suelo ($p=0.00$), y no la hay con la temperatura del suelo ($p=0.44$). Esto concuerda con lo observado por Tiruvaimozhi y Sankaran (2019) en praderas montañosas y por Murcia y Ochoa (2008) en pastizales, donde la temperatura del suelo es un predictor débil de la respiración del suelo.

Además, la humedad es el factor principal que influye en la emisión de CO₂, por su influencia en factores fisiológicos, bioquímicos y ecológicos, como la disponibilidad de sustratos en descomposición, la movilidad de nutrientes y materia orgánica disuelta. Las tasas de respiración del suelo pueden aumentar entre el invierno y el verano, no solo porque los suelos se calientan, sino también porque el contenido de agua disminuye desde las condiciones saturadas en el invierno hasta los contenidos de agua óptimos a principios del verano (Davidson *et al.*, 2000).

La relación entre el CO₂ proveniente del suelo y la temperatura ambiental es fundamental para investigar como los cambios de la temperatura global pueden influir sobre las tasas de emisiones del suelo (Murcia y Ochoa, 2012, 2008; Raich *et al.*, 2002). Con base en esto y en los resultados obtenidos por el modelo lineal general ($p \leq 0.05$) y de acuerdo con Murcia y Ochoa (2008), quienes encontraron que las emisiones son homogéneas durante la noche en determinadas estaciones del año, los horarios ideales para la medición de CO₂ mediante la cámara de flujo LI-COR 8100A son: 08:00, 10:00, 12:00 y 14:00, y buenos aunque menos convenientes, 16:00 y 18:00 (Cuadro 2), en dos intervalos cada 30 y 120 min. Algunos horarios coinciden con lo establecido por Villanueva *et al.* (2014) quienes realizaron cuatro mediciones al día a cada 6 h: 00:00, 06:00, 12:00 y 18:00 en sistemas silvopastoriles.

Davidson *et al.* (2000) y Murcia y Ochoa (2008) encontraron que la temperatura del suelo es relativamente constante durante la noche y no presenta una relación significativa con las emisiones de CO₂. La relación entre la emisión de CO₂ y la temperatura con frecuencia se describe por una función exponencial. Por eso a nivel local, las variaciones en la temperatura

are not significant ($p > 0.05$). However, it displays a better fit (Figure 3) at intervals of 120 min (R^2 adjusted = 97.48%) and a lower fit (Figure 4) at intervals of 30 min (R^2 adjusted = 93.20%). There is a statistically significant relation with air temperature ($p=0.00$), rainfall ($p=0.01$) and soil moisture ($p=0.00$), and there is none with soil temperature ($p=0.44$). These agrees with those findings by Tiruvaimozhi and Sankaran (2019) in hilly grasslands, and by Murcia and Ochoa (2008) in grasslands, where the soil temperature is a weak predictor of soil respiration.

In addition, moisture is the driver contributing to CO₂ emission, due to its influence on physiological, biochemical and ecological factors such as the availability of substrates in decomposition, the mobility of nutrients and dissolved organic matter. Soil respiration rates can increase between winter and summer, not only because soils heat up, but also because water contents fall, from saturated conditions in the winter, to optimum water contents in the early summer (Davidson *et al.*, 2000).

The relation between CO₂ from the soil and environmental temperature is key to investigating how global temperature changes can influence soil emission rates (Murcia and Ochoa, 2012, 2008; Raich *et al.*, 2002). Based on this and the results obtained by the general linear model ($p \leq 0.05$), following Murcia and Ochoa (2008), who found that emissions are homogenous during the night in certain seasons of the year, the ideal daytime hours for CO₂ with the LI-COR 8100A flow chamber are 08:00, 10:00 h, 12:00 and 14:00 h, and good, although less convenient, are 16:00 and 18:00 h (Table 2), in two intervals every 30 and 120 min. Some daytime hours coincide with that established by Villanueva *et al.* (2014), who carried out for measurements per day every 6 h: 00:00, 06:00, 12:00 and 18:00 h in agroforestry plus livestock systems.

Davidson *et al.*, (2000) and Murcia and Ochoa (2008) found that the soil temperature is relatively constant during the night and presents no significant relation with CO₂ emissions. The relation between CO₂ emission and temperature is frequently described with an exponential function. Due to this, at a local level, variations in temperature and soil moisture explain the variation in CO₂ emissions in the short term (Villanueva *et al.*, 2014). The statistic values produced in our study suggest that rainfall did not influence CO₂ emissions directly.

Cuadro 2. Valores con probabilidad significativa de acuerdo con los horarios e intervalos de muestreo.**Table 2. Values with significant probability according to daytime hours and sampling intervals.**

Hora	Cada 30 min	Cada 120 min	Hora	Cada 30 min	Cada 120 min
00:00	0.00 [†]	0.70	12:00	0.00	0.00
00:30	0.01		12:30	0.00	
01:00	0.05		13:00	0.00	
01:30	0.04		13:30	0.00	
02:00	0.32	0.22	14:00	0.01	0.01
02:30	0.10		14:30	0.20	
03:00	0.46		15:00	0.91	
03:30	0.34		15:30	0.07	
04:00	0.99	0.00	16:00	0.01	0.09
04:30	0.18		16:30	0.03	
05:00	0.04		17:00	0.20	
05:30	0.12		17:30	0.00	
06:00	0.19	0.31	18:00	0.00	0.09
06:30	0.10		18:30	0.00	
07:00	0.01		19:00	0.00	
07:30	0.00		19:30	0.00	
08:00	0.00	0.00	20:00	0.29	0.54
08:30	0.00		20:30	0.76	
09:00	0.00		21:00	0.95	
09:30	0.05		21:30	0.12	
10:00	0.00	0.01	22:00	0.15	0.61
10:30	0.04		22:30	0.00	
11:00	0.31		23:00	0.19	
11:30	0.00		23:30	0.00	

[†] El valor del coeficiente $p \leq 0.05$ en ambos intervalos indica horarios ideales para toma de muestras donde se presentaron diferencias significativas. ♦ The coefficient value $p \leq 0.05$ in both intervals indicates ideal daytime hours for sampling where significant differences were present.

y en la humedad del suelo explican la variación de las emisiones de CO_2 en el corto plazo (Villanueva *et al.*, 2014). Los estadísticos realizados en nuestro estudio sugieren que las precipitaciones no influyeron de manera directa en las emisiones de CO_2 .

Con los resultados anteriores se ajustó un modelo para estimar las emisiones de CO_2 de acuerdo con la humedad del suelo y la temperatura ambiental en una zona cubierta con pasto. Como lo indicaron Murcia y Ochoa (2008) se puede utilizar para considerar las emisiones nocturnas:

$$\text{CO}_2 = -32.49 + 0.5080 \text{ Temperatura ambiental } (^\circ\text{C}) + 59.56 \text{ Humedad del suelo } (\text{m}^3 \text{m}^{-3})$$

The above results were used to adjust a model to estimate CO_2 emissions according to the soil moisture and environmental temperature in a grass-covered area. As stated by Murcia and Ochoa (2008), it can be used to consider night-time emissions:

$$\text{CO}_2 = -32.49 + 0.5080 \text{ Ambient Temperature } (^\circ\text{C}) + 59.56 \text{ Soil moisture } (\text{m}^3 \text{m}^{-3})$$

The significance of variables and statistics to test the suitability of the equation indicate that all assumptions were proven in a satisfactory manner (Table 3). Following our results and applying the model for grass-covered soil in the center of the

El carácter significativo de las variables y los estadísticos de prueba para la comprobación de la idoneidad de la ecuación, indica que todos los supuestos se cumplieron en forma satisfactoria (Cuadro 3). Al seguir nuestros resultados y aplicar el modelo para un suelo cubierto por pasto en el centro del país, temperatura media anual de 23.5 °C y humedad en el suelo de 0.47 m³ m⁻³, el resultado emitido es 7.44 μmol de CO₂ m⁻² s⁻¹. Como se observa, lo anterior no se aleja de los datos observados. Cantú *et al.* (2010) determinaron una respiración del suelo de 0.01 μmol m⁻² s⁻¹ con *Dichanthium annulatum*, a una temperatura ambiente de 36 °C y humedad del suelo de 0.22 m³ m⁻³, y al realizar una validación del modelo obtenido encontraron -1.1 μmol m⁻² s⁻¹; mientras que con temperatura de 30 °C y humedad de 0.37 m³ m⁻³ en suelos con *Leucaena* registraron 3 μmol m⁻² s⁻¹, y el modelo determina 4.79 μmol m⁻² s⁻¹.

Además, en un ecosistema de sabana a una temperatura media anual de 16.3 °C y humedad del suelo de 0.48 m³ m⁻³ la emisión fue 4.8 μmol m⁻² s⁻¹; bajo las mismas condiciones Tang y Baldocchi (2005) encontraron 1.8 μmol m⁻² s⁻¹. El modelo de regresión lineal presentó un error de ±2 μmol m⁻² s⁻¹. Es importante resaltar que el modelo determina 50% de la variación y el otro 50% se podría explicar por variables del desarrollo y morfo-fisiología de pasto, así como por las propiedades fisicoquímicas del suelo (Murcia y Ochoa, 2008). Además, otros factores como la biomasa radical, la actividad microbiana y la calidad del residuo vegetal (Wang *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

Un protocolo de cuantificación se elaboró para las emisiones de CO₂ desde el suelo, se puede replicar para diferentes usos y en particular fue efectivo en suelos cubiertos con pasto.

country, with an annual mean temperature of 23.5°C and soil moisture of 0.47 m³ m⁻³, the result is 7.44 μmol of CO₂ m⁻² s⁻¹. As observed, this is not far from the data observed. Cantú *et al.* (2010) determined a soil respiration rate of 0.01 μmol m⁻² s⁻¹ with *Dichanthium annulatum*, at an environmental temperature of 36 °C and a soil moisture of 0.22 m³ m⁻³, and after validating the model obtained, they found -1.1 μmol m⁻² s⁻¹. Meanwhile, with a temperature of 30 °C and a soil moisture of 0.37 m³ m⁻³ in soils with *Leucaena*, they registered 3 μmol m⁻² s⁻¹; the model establishes 4.79 μmol m⁻² s⁻¹.

Additionally, in a savannah ecosystem with a mean annual temperature of 16.3°C and a soil moisture of 0.48 m³ m⁻³, the emission was of 4.8 μmol m⁻² s⁻¹. Under the same conditions, Tang and Baldocchi (2005) found 1.8 μmol m⁻² s⁻¹. The linear regression model rendered an error of ±2 μmol m⁻² s⁻¹. It is important to highlight that the model determines 50% of the variation and the other 50% can be explained by other development and morpho-physiology variables of the grass, as well as by soil physicochemical properties (Murcia and Ochoa, 2008) and other factors such as the root biomass, microbial activity and the quality of the plant debris (Wang *et al.*, 2010).

CONCLUSIONS

A quantification protocol was created for CO₂ emissions from the soil, the protocol can be replicated for different uses and it was particularly effective on grass-covered soils.

The emissions recorded in intervals of 120 min were the best describing fluctuations during daytime.

The model protocol has the potential to be applied in the development of mitigation strategies and adaptation to climate change.

Cuadro 3. Validación del modelo de emisiones de CO₂ provenientes del suelo.
Table 3. Validation of the model for soil CO₂ emission.

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-32.49	1.44	-22.62	0.000	
Temperatura ambiental	0.5080	0.0247	20.53	0.000	1.19
Humedad del suelo	59.56	2.34	25.48	0.000	1.19
		S	R ²	R ² (ajustado)	R ² (predicho)
		1.57669	51.34%	51.20%	50.90%

Las emisiones registradas en intervalos de 120 min describieron mejor la fluctuación durante el periodo diurno.

El protocolo modelo tiene potencial para aplicarse en el desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca otorgada en el "Programa de estancias posdoctorales vinculadas al fortalecimiento de la calidad del Posgrado Nacional 2018 (1)." A la Universidad Autónoma Chapingo (DGIP, CIRENAM y Departamento de Suelos) donde se realizó la investigación. A los revisores cuyos comentarios ayudaron a mejorar el manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Abdalla, K., M. Mutema, P. Chivenge, C. Everson and V. Chaplot, 2018. Grassland degradation significantly enhances soil CO₂ emission. *Catena* 167: 284–292.
- Bain, W. G., L. Hutrya, D. C. Patterson, A. V. Bright, B. C. Daube, J. W. Munger and S. C. Wofsy. 2005. Wind-induced error in the measurement of soil respiration using closed dynamic chambers. *Agric. For. Meteorol.* 131: 225–232.
- Bradford, J. and M. Ryan. 2008. Quantifying soil respiration at landscape scales. *In: Hoover, C. (ed). Field Measurements for Forest Carbon Monitoring.* Springer, Dordrecht. pp: 143–162.
- Cantú, I., H. González, and M. V. Gómez. 2010. CO₂ Efflux in Vertisol under different land use systems. *Trop. Subtrop. Agroecos.* 12: 389–403.
- Chi, Y., P. Yang, S. Ren, N. Ma, J. Yang, and Y. Xu, 2020. Effects of fertilizer types and water quality on carbon dioxide emissions from soil in wheat-maize rotations. *Sci. Total Environ.* 698: 1–9.
- Clough, T. J., P. Rochette, S. Thorams, M. Pihlatie, J. R. Christiansen, and R. E. Thorman. 2015. *In: Cecile de Klein, and M. Harvey (eds). Nitrous Oxide Chamber Methodology Guidelines Nitrous Oxide Chamber Methodology Guidelines.* 1.1. ed. New Zealand. pp: 146.
- Cueva, A., E. A. Yépez, J. Garatuza, C. J. Watts, y J. C. Rodríguez. 2012. Diseño y uso de un sistema portátil para medir la respiración de suelo en ecosistemas. *Terra Latinoam.* 30: 327–336.
- Davidson, E. A., K. Savage, L. Vercho, and R. Navarro. 2002. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agric. For. Meteorol.* 113: 21–37.
- Davidson, E. A., L. V. Verchot, J. Henrique Cattáneo, I. L. Ackerman, and J. E. M. Carvalho. 2000. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry* 48: 53–69.
- Dowhower, S. L., W. R. Teague, K. D. Casey, and R. Daniel, 2020. Soil greenhouse gas emissions as impacted by soil moisture and temperature under continuous and holistic planned grazing in native tallgrass prairie. *Agric. Ecosyst. Environ.* 287: 106647.
- Dunne, T., and L. B. Leopold. 1978. *Water in Environmental Planning.* Freeman, W. H. (ed). 818 p.
- Gómez, J., A. Monterroso, L. Lechuga, A. Arce. and P. Ruiz, 2017. Impact of climate change on soil organic carbon content on agricultural soils of Mexico, *In: Angelov, P., J. Iglesias, and J. Corrales (eds). Advances in Information and Communication Technologies for Adapting Agriculture to Climate Change.* pp: 58–69.
- Laurencena, M. I., M. S. Carponi, P. D. Reinoso, M. Butus, C. Scorciapino, M. Galli, y G. Pérez. 2009. Comportamiento de céspedes de *Cynodon dactylon* (L.) Pers. en Paraná, Entre Ríos, Argentina. *Ciencia, docencia y Tecnología.* pp: 129–141.
- Li, Z., J. Gao, L. Wen, C. Zou, C. Feng, D. Li, and D. Xu. 2019. Dynamics of soil respiration in alpine wetland meadows exposed to different levels of degradation in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Sci. Rep.* 9: 1–14.
- LI-COR Biosciences. 2015. Using the LI-8100A soil gas flux system. 232 p.
- Mishra, U., R. Lal, B. Slater, F. Calhoun, D. Liu, and M. Van Meirvenne. 2009. Predicting soil organic carbon stock using profile depth distribution functions and ordinary kriging. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 614.
- Murcia, M., y M. Ochoa, 2012. Respiración del suelo y caída de hojarasca en el matorral del bosque altoandino (Cuenca del Río Pamplonita, Colombia). *Caldasia* 34: 165–185.
- Murcia, M., y M. Ochoa. 2008. Respiración del suelo en una comunidad sucesional de pastizal del bosque Altoandino en la cuenca del Río Pamplonita, Colombia. *Caldasia* 30: 337–353.
- Parkin, T. and R. Venterea. 2010. Chamber-based trace gas flux measurements. *In: Follet, R. (ed.) IN Sampling Protocols.* pp: 1 – 39. https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/np212/Chapter_3_GRACEnet_Trace_Gas_Sampling_Protocols.pdf. (Consulta: mayo 2019).
- Pompa, M., and J. Sigala, 2017. Variation of carbon uptake from forest species in Mexico: a review. *Madera y Bosques* 23: 225–235.
- Raich, J. W., C. Potter, and D. Bhagawati. 2002. Interannual variability in global soil respiration, 1980 - 94. *Glob. Change Biol.* 8: 800–812.
- Ru, J., Y. Zhou, D. Hui, M. Zheng, and S. Wan, 2018. Shifts of growing-season precipitation peaks decrease soil respiration in a semiarid grassland. *Glob. Chang. Biol.* 24: 1001–1011.
- Ryan, E. M., K. Ogle, H. Kropp, K. E. Samuels-Crow, Y. Carrillo, and E. Pendall. 2018. Modeling soil CO₂ production and transport with dynamic source and diffusion terms: Testing the steady-state assumption using DETECT v1.0. *Geosci. Model Dev.* 11: 1909–1928.
- Serran, E. Z., M. Nuñez, y E. Valleter, 2017. Respiración de dióxido de carbono de suelo, en bosque tropical húmedo – Gamboa Panamá Carbon. *I+D Tecnológico.* 13: 49–54.
- Singh, B.P, V. de Rémy de Courcelles, and M.A. Adams, 2011. Soil Respiration in Future Global Change Scenarios. *In: Singh, B. P., A. L. Cowie, and K. Y. Chan. (eds). Soil Health and Climate Change.* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 131–153.
- Tang, J., and D. D. Baldocchi. 2005. Spatial-temporal variation

- in soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components. *Biogeochemistry* 73: 183–207.
- Tiruvaimozhi, Y. V. and M. Sankaran. 2019. Soil respiration in a tropical montane grassland ecosystem is largely heterotroph-driven and increases under simulated warming. *Agric. For. Meteorol.* 276–277: 107619.
- Villanueva, G., F. Casanova, L. Ramírez y P. Martínez. 2014. Influencia del sistema silvopastoril “cercas vivas” de *Gliricidia sepium* en la respiración del suelo en Tacotalpa, Tabasco, México. *Trop. Subtrop. Agroecosystems* 17: 261–266.

