

Respiración de CO₂ desde el suelo en bosques templados del Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl, centro de México

Respiration of CO₂ from the soil of temperate forests in the Iztaccihuatl-Popocatepetl National Park, Mexico

Yadihra Cruz-Sánchez ^a, Leticia C. López-Teloxa ^b,
Jesús D. Gómez-Díaz ^c, Alejandro I. Monterroso-Rivas ^{c*}

^aUniversidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, km 38,5 Carretera México Texcoco, Chapingo, México 56230.

^bUniversidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia, km 38,5 Carretera México Texcoco, Chapingo, México 56230.

*Autor de correspondencia: ^c Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos, km 38,5 Carretera México Texcoco, Chapingo, México 56230, aimrivas@correo.chapingo.mx

SUMMARY

In temperate forests, climatic and plant species diversity lead to important changes in soil respiration. The objective of this study was to analyze the respiration of the soil from changes in carbon dioxide emitted in a temperate forest in central Mexico to know its spatial and temporal variation. To do this, emissions were measured with a LI-COR continuous flow chamber (LI8100A), in winter and spring and in three forest communities: pine forest; mixed pine, oyamel and aile forest; as well as mixed pine and oyamel forest. Its relationship with vegetation cover, temperature and humidity, both environmental and soil, was explored. Statistical tests were applied to find correlations among variables, ecosystems and soil respiration. Results show that soil respiration varied both seasonally and among the different forest covers evaluated. The winter season was from 1.07 to 2.10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, higher for the pine forest and lower for the association of pine and oyamel. In the spring it was 1.28 to 5.15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, higher for the association of pine and oyamel and lower for the pine, oyamel and aile forests. Soil respiration was found to be influenced by vegetation cover, soil temperature and moisture, and weather conditions depending on the season of the year. The information will allow estimating emissions by soil respiration in temperate forests of the country.

Keywords: soil humidity, soil temperature, pine, sacred fir, mexican alder.

RESUMEN

En bosques templados la diversidad climática y de especies vegetales propician cambios importantes en la respiración del suelo. El objetivo de este estudio es analizar la respiración del suelo a partir de cambios en el dióxido de carbono emitido en un bosque templado del centro de México a fin de conocer su variación espacial y temporal. Para ello, la respiración se midió con una cámara de flujo continuo LI-COR (LI8100A), en invierno y primavera y en tres comunidades de bosque: bosque de pino; bosque mixto de pino, oyamel y aile; así como bosque mixto de pino y oyamel. Se exploró su relación con la cobertura vegetal, temperatura y humedad tanto ambiental como edáfica. Se aplicaron pruebas estadísticas para encontrar correlaciones entre variables, ecosistemas y respiración del suelo. Los resultados muestran que la respiración del suelo varió tanto estacionalmente como entre las diferentes coberturas de bosque evaluadas. Para la temporada invernal fue desde 1,07 hasta 2,10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mayor para el bosque de pino y menor para la asociación de pino y oyamel; en primavera fue de 1,28 a 5,15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mayor para la asociación de pino y oyamel y menor para el bosque de pino, oyamel y aile. Se encontró que la respiración edáfica está influenciada la cobertura vegetal, la temperatura y humedad del suelo, y las condiciones climáticas dependiendo de la temporada del año. La información permitirá estimar las emisiones por respiración del suelo en bosques templados del país.

Palabras clave: humedad suelo, temperatura suelo, pino, oyamel, aile.

INTRODUCCIÓN

La respiración del suelo desempeña un papel importante en la regulación de la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO₂), el equilibrio global de carbono

y a la retroalimentación asociada al cambio climático (Yan *et al.* 2019). Está relacionada con características bióticas como el metabolismo de las plantas, la fotosíntesis y la materia orgánica presente en la capa superficial del suelo (Ryan y Law 2005). También se relaciona con atributos

abióticos como temperatura del suelo, humedad del suelo y otras condiciones ambientales menores. Así pues, la respiración del suelo se define como la producción total de CO₂, por unidad de área y de tiempo, en suelos intactos debido a la respiración de organismos edáficos, raíces, hifas micorrízicas, y, en menor extensión, por la oxidación química de los compuestos de carbono (Raich & Schlesinger 1992). Las superficies cubiertas con bosques son particularmente interesantes para estudiar cómo se presentan los balances en las emisiones de gases efecto invernadero, como el bióxido de carbono.

Las tierras cubiertas de árboles, incluidas las tierras forestales, cubren aproximadamente el 28 % de la superficie terrestre (Oertel *et al.* 2016). En conjunto con la agricultura y otros usos del suelo son el segundo mayor emisor de gases de efecto invernadero (GEI) que representa 24 % del total de emisiones globales (Waheed *et al.* 2018). Sin embargo, al perturbar los ecosistemas forestales, mediante la deforestación y degradación para usos agrícolas, la extracción de madera y la expansión de asentamientos humanos, entonces se suman 17 % a las emisiones mundiales de CO₂ (Santini *et al.* 2019). Las comunidades forestales son participantes activos de las dinámicas globales climáticas. Sin embargo, las altas fluctuaciones espaciales, temporales e interanuales de la respiración del suelo hacen que sea difícil determinar las emisiones de CO₂ en diferentes entornos.

Los métodos directos, como las mediciones realizadas con apoyo de cámaras dinámicas de intercambio gaseoso abiertas o cerradas entre el suelo y la atmósfera, proporcionan información esencial sobre la respiración del suelo cuantificando la concentración CO₂ durante un período de tiempo definido (Yadav y Wang 2017). A pesar de que se ha criticado el uso de cámaras para la medición de la respiración del suelo ya que pueden ser afectadas por la temperatura, la radiación solar y las condiciones de viento, son sumamente útiles para separar los componentes de la respiración. Estas mediciones de CO₂ representan la suma de una variedad de procesos donde se incluyen la respiración de la raíz, la oxidación heterotrófica de los organismos de la materia orgánica del suelo y de la parte aérea de la vegetación (López Santos y Gil Marín 2008).

México ha impulsado desde hace algunos años políticas nacionales para desarrollar estrategias y acciones para afrontar los efectos del cambio climático, como es el caso del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018, que estableció las bases de las acciones a seguir complementadas con el Programa Especial y los Programas Estatales de Cambio Climático (ENCC 2013). El país avanza en el cumplimiento de compromisos relacionados con inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero (INECC 2018) Las emisiones totales del país, de acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2017 (INECC 2019), se situaron en 734 millones de toneladas de CO₂e, lo que representa un aumento del 65 % con respecto a 1990. El principal motor del

crecimiento de las emisiones es el consumo de combustibles fósiles para transporte y la generación de electricidad, seguido de actividades como la ganadería y la industria del petróleo y el gas. Sin embargo, de acuerdo con la Ley General de Cambio Climático (LGCC), los porcentajes de reducción de emisiones a lograr por sector para 2030 son: 18 % en transporte, 31 % en producción de energía eléctrica y calor, 8 % en agricultura y ganadería, 5 % en procesos industriales y uso de productos, 28 % en residuos, 14 % en petróleo y gas natural y 18 % en residencial y comercial (DOF 2021).

Según el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero en los bosques nacionales las absorciones de CO₂ se deben principalmente a procesos de captación de la vegetación durante la fotosíntesis. Por otra parte, la producción de CO₂ en los bosques, sin considerar su degradación (donde se libera hacia la atmósfera el carbono que alguna vez fue almacenado), se origina por la respiración del suelo principalmente, no considerada por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático. Se incluyen en este inventario, las emisiones y absorciones de CO₂ debidas a cambios en la biomasa, en la materia orgánica, pero no se incluye el proceso de respiración del suelo en este u otros tipos de ecosistemas.

En el presente estudio se reporta un acercamiento a la cuantificación de las emisiones de CO₂ provenientes del suelo en un ecosistema forestal, que pueden ser consideradas para fundamentar líneas de base para propuestas en el cálculo y estimación del sector forestal en el inventario nacional de emisiones. Los bosques mexicanos observan tasas de deforestación elevadas comparadas con cifras mundiales, estimadas a un ritmo de 500.000 ha durante la década de los años noventa (Covaleda *et al.* 2009) y las emisiones de CO₂ a causa del cambio de uso de suelo ya han sido estudiados. Por ejemplo, Báez *et al.* (2006) estudiaron las tasas de emisión de CO₂ en suelos volcánicos en ecosistemas naturales y suelos degradados (tepetates) habilitados para la producción agrícola; reportan que la tasa de emisión decreció desde los meses con mayor precipitación a los meses más secos, las zonas degradadas presentaron las tasas de emisión más bajas, sin embargo, aumentaron paulatinamente con los años de cultivo y fue mayor la tasa de emisión en los sistemas agrícolas. Por su parte, Campos (2014) sugiere que el cambio de uso de suelo para tierras de cultivos tiene potencial de modificar las tasas de respiración del suelo, al igual que la temperatura y el agua del suelo, al influir en el microclima del suelo y la entrada de sustrato orgánico al suelo. Cueva *et al.* (2016) realizan un valioso ejercicio de estudios de respiración en México, donde se observa que dominan aquellos realizados en sistemas agrícolas y forestales tropicales sobre los realizados en bosques templados conservados.

La diversidad de especies vegetales en sitios conservados y la variación de las condiciones climáticas, da como resultado cambios importantes en las tasas de respiración del suelo; para esta contribución se reportan las primeras

mediciones de respiración del suelo realizadas dentro de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan a lo largo de las principales coberturas vegetales presentes. Así, el objetivo de este estudio es analizar la respiración del suelo a partir de cambios en el dióxido de carbono emitido en un bosque templado de México ubicado dentro del Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl, a fin de conocer su variación espacial y temporal.

A razón de ello, los objetivos particulares del trabajo son: a) comparar las tasas de respiración del suelo de un bosque templado en tres clases de cobertura vegetal (comparación espacial): 1) bosque de pino, 2) bosque de pino, oyamel y aile y 3) bosque de pino y oyamel. b) Analizar la respiración en dos temporadas del año (estudio temporal): primavera e invierno y finalmente c) analizar la correlación de la respiración del suelo con la temperatura y la humedad edáfica, así como variables ambientales (temperatura ambiental, humedad ambiental y radiación solar).

Las hipótesis son: a) la respiración del suelo es mayor en coberturas vegetales mixtas en comparación de masas puras; y b) la respiración del suelo será mayor durante la temporada más calurosa (primavera) en comparación con la temporada más fría (invernal). Con lo anterior, se tendrá información detallada sobre emisiones de CO₂ en suelos forestales de climas templados y del centro de México, que permita contar con más información sobre los ecosistemas, así como ser más específicos en los factores de cálculo nacionales del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, así como mejores prácticas de manejo y conservación forestal.

MÉTODOS

Área de estudio. El estudio se realizó en el centro de México, en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan que se localiza en los municipios de Ixtapaluca y Chalco del Estado de México. Su centroide se encuentra en las coordenadas 19° 15' 29" N y 98° 37' 45" W (Chávez-Salcedo *et al.* 2018) y ocupa un área de 1.640 ha. Los climas dominantes son, en las partes más altas semifríos [C(E)(w2)(w)] y circunscribiendo a estos, el clima es templado del tipo C(w2)(w), según la clasificación de Koeppen modificada por García (1988). La precipitación media anual va de 800 hasta 1.200 mm mientras que la temperatura promedio anual va de 6 °C en las zonas más altas hasta los 14 °C (Lomas-Barrié *et al.* 2005). La vegetación característica es de bosques templados, siendo el bosque de pino el de mayor extensión (Lomas-Barrié *et al.* 2005). Sin embargo, también se puede encontrar *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. *et* Cham (oyamel), *Quercus* spp. (encino) (Chávez-Salcedo *et al.* 2018), *Alnus firmifolia* Fernald (aile) (Paredes-Gonzalez *et al.* 2018), *Pinus hartwegii* Lindl. (pino de las alturas) y *Pinus montezumae* Lam (ocote), principalmente (Chávez-Salcedo *et al.* 2018). La textura del suelo es clasificada como Franco-arenosa (Matías Ramos *et al.* 2020). El origen volcánico es dominante, con clase ígnea

extrusiva que derivan en suelos profundos de tipo andosol (Paredes-Gonzalez *et al.* 2018).

Bosque y cubierta vegetal estudiadas. Se analizó la respiración del suelo de tres tipos de cobertura durante invierno y primavera. Las tres coberturas seleccionadas son los tipos de vegetación más abundantes en la Estación Forestal de acuerdo con el Uso del suelo y vegetación, escala 1:250.000, serie VI del INEGI (INEGI 2017) además de que las condiciones climáticas son contrastantes en los dos periodos:

Bosque de pino (BP): El sitio se encuentra a una altura promedio de 3.283 m s.n.m. La especie arbórea dominante es *Pinus hartwegii*, en el sotobosque prolifera el zacatón (*Muhlenbergia macroura* (H.B.K.) Hitchc.) (Chávez-Salcedo *et al.* 2018), que cubren cerca del 95 % de la superficie del suelo. Presenta alta regeneración natural y abundantes residuos de acículas, por lo que la cantidad de materia orgánica en descomposición en los primeros 10 cm del suelo es abundante. Existe gran cantidad de raíces del estrato herbáceo hasta aproximadamente los 30 cm de profundidad del suelo. Los suelos en este sitio son profundos (Paredes-Gonzalez *et al.* 2018), con buen drenaje y aireación, además conservan un alto porcentaje de humedad edáfica, razón por la cual prolifera la actividad microbiana. Debido a la presencia de estratos de porte bajo, no se observan problemas de erosión.

Bosque de pino, oyamel y aile (BPOA): El sitio se caracteriza por la asociación de *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa* y *Alnus firmifolia* (Paredes-Gonzalez *et al.* 2018). En el estrato arbustivo, la especie dominante es *Larrea* spp. (jarilla), mientras que en el estrato herbáceo dominan diferentes especies de pastos y musgo, cubriendo cerca del 80 % del suelo forestal. Está ubicado a una altitud de 3.305 m s.n.m. El suelo cuenta con una gran cantidad de materia orgánica en descomposición, además se observan gran cantidad de pastos. Son suelos profundos de color café oscuro con gran cantidad de raíces presentes en los primeros horizontes.

Bosque pino y oyamel (BPO): Aquí se caracteriza por asociación entre *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa*. La vegetación herbácea está dominada principalmente por musgo. Está ubicado a una altitud de 3.337 m s.n.m. Los suelos son profundos de color café oscuro, ricos en materia orgánica y muy húmedos. Dentro de los primeros 30 cm de profundidad se pueden encontrar gran cantidad de raíces de la vegetación herbácea presente.

Respiración de suelo. La respiración del suelo se midió con una cámara de flujo continuo modelo LI-8100A (LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA), misma que se colocó encima de un collar de PVC insertado en el suelo previamente a una profundidad de cinco centímetros aproximadamente (López *et al.* 2020). El aire acumulado en el interior de la cámara es enviado a un analizador (conectado a la cámara) integrado con espectroscopía de absorción óptica en la re-

gión infrarroja (IRGA) donde el CO₂ se detecta y es cuantificado. Además, en la cámara se incluyen dos sensores que registraron la información de temperatura y humedad del suelo al mismo tiempo que se cuantificó el CO₂, modelo Soil Temperature Probe y Theta Soil Moisture Probe, respectivamente. Se instalaron los collares con 24 horas de anticipación en cada rodal medido para evitar mediciones de la respiración del suelo incorrectas por alteraciones en el suelo (Cueva-Rodríguez *et al.* 2012).

El CO₂ atmosférico acumulado en la cámara se midió como CO₂ μmol m⁻² s⁻¹ de aire seco. Todas las mediciones se tomaron a cada media hora durante 90 segundos con 30 segundos de banda muerta, una pre-purga de 60 segundos y la pos-purga de 30 segundos. Dentro de la cámara se genera una línea de concentración de CO₂ cuya pendiente se usa para calcular la tasa de respiración del suelo con base en la ecuación 1.

$$F_c = \frac{10VP_0 \left(1 - \frac{W_0}{1000}\right) \partial C'}{RS(T_0 + 273.15)} \frac{\partial C'}{\partial t} \quad [1]$$

donde F_c es la tasa de flujo de CO₂ del suelo (μmol m⁻² s⁻¹), V es el volumen de la cámara (cm³), P_0 es la presión inicial (k Pa), W_0 es la fracción de mol de vapor de agua inicial (m mol 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 $\partial C'/\partial t$ es la tasa de cambio inicial en la fracción molar de CO₂ corregida en agua (μmol mol⁻¹).

Diseño experimental. Los datos de respiración, temperatura y humedad del suelo se tomaron a partir de las 09:00 horas y hasta las 17:00 horas en cada una de las diferentes coberturas para la temporada de invierno (17-19 de febrero del 2019). Para la temporada de primavera (22-24 de mayo del 2019) la información se registró a partir de las 11:00 hasta las 17:00 horas. De esta forma se tomaron un total de 270 registros de respiración, temperatura y humedad del suelo: para la temporada de invierno 51 registros de estas variables (cada uno) y 39 registros de cada una para primavera.

Paralelamente datos meteorológicos diarios fueron obtenidos mediante una estación meteorológica que se ubica dentro de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan aproximadamente a 500 m de los sitios estudiados (17-19 de febrero y 22-24 de mayo del 2019). Las variables consideradas fueron temperatura ambiente, humedad relativa y radiación solar. Cabe mencionar que durante los periodos de medición no se presentaron eventos de precipitación, por lo que esta condición meteorológica no se tomó en cuenta. De modo que la información meteorológica consistió en 270 datos, 51 para invierno y 39 para primavera divididos en las tres variables mencionadas anteriormente y se organizó en una base de datos emparejada con las mismas horas que las mediciones de respiración del suelo tomadas por la cámara.

Análisis estadístico. Se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor y su correspondiente análisis Tukey HSD para probar las diferencias entre las variables (respiración, temperatura y humedad del suelo), coberturas vegetales y temporadas del año. Además, se aplicó el “Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test” para comprobar la normalidad de los datos, después se procedió a aplicar la correlación de Spearman para conocer la influencia de la temperatura y humedad del suelo sobre el comportamiento de respiración edáfica para cada una de las temporadas del año. Todos los análisis estadísticos se realizaron con un nivel de significancia de 0,05 y con el software R (versión 3.4.0).

RESULTADOS

Variabilidad espacial y temporal de las tasas de respiración del suelo. La respiración del suelo en el bosque templado en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan varió tanto temporal como espacialmente entre las coberturas vegetales (figura 1). Las variaciones se presentan en el cuadro 1 de acuerdo con la temporada del año y la cobertura vegetal medida. Se puede observar que el bosque mixto de pino y oyamel presentó el valor más elevado de respiración del suelo en primavera y el bosque pino el mayor en invierno, mientras que en esta misma temporada el bosque mixto de pino y oyamel mostró el valor más bajo; en primavera el valor menor de respiración del suelo lo presentó el bosque mixto de pino oyamel y aile.

Durante el periodo invernal (febrero) el promedio de respiración edáfica fue de 1,85 μmol m⁻² s⁻¹ para el bosque de pino, 1,55 μmol m⁻² s⁻¹ para el bosque de pino, oyamel y aile y 1,20 μmol m⁻² s⁻¹ para el bosque de pino y oyamel, con un coeficiente de variación (CV) entre coberturas de 19 %. En el periodo de primavera (mayo) la media de la respiración del suelo fue de 3,85, 2,25 y 4,34 μmol m⁻² s⁻¹ para el bosque de pino, pino, oyamel y aile, y pino y oyamel, respectivamente, con un CV de 28 % (cuadro 2). Estos valores exhibieron una fuerte estacionalidad, al observar en promedio 1,53 ± 0,29 y 3,47 ± 0,99 μmol m⁻² s⁻¹ de emisión para la temporada de invierno y primavera. En este caso, el CV entre primavera e invierno fue de 50 %.

Cuadro 1. Rango de valores de respiración del suelo en μmol m⁻² s⁻¹ por temporada y cobertura vegetal.

Range of soil respiration values in μmol m⁻² s⁻¹ per season and vegetal cover.

Temporada/ Cobertura vegetal	BP	BPOA	BPO
Invierno	1,63 - 2,10	1,21 - 1,85	1,07 - 1,32
Primavera	3,05 - 4,49	1,28 - 3,05	3,63 - 5,15

BP: bosque de pino; BPOA: bosque de pino, oyamel y aile; BPO: bosque de pino y oyamel.

En las dos temporadas del año, la respiración del suelo fue estadísticamente diferente ($P < 0,05^*$) al igual que por cobertura vegetal. Los valores para la temporada invernal fueron desde 1,07 hasta 2,10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mientras que, en primavera se encuentran entre 1,28 y 5,15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Las tasas de respiración del suelo en la temporada invernal fueron mayores para el bosque de pino y menores para la asociación de pino y oyamel, mientras que, en la temporada de primavera este bosque (BPO) fue el que presentó la mayor respiración del suelo y el bosque de pino, oyamel y aile la menor.

Respiración, temperatura y humedad. Se detectaron diferencias significativas ($P < 0,05^*$) en la temperatura y humedad del suelo a una profundidad de 10 cm tanto en diferentes coberturas como entre las dos temporadas del

año. En invierno la temperatura del suelo registró valores medios de 6,64 °C, 6,65 °C y 5,91 °C para bosque de pino, bosque de pino, oyamel y aile y bosque de pino y oyamel, respectivamente, mientras que para la temporada de primavera los valores medios fueron 10,12 °C, 10,90 °C y 10,57 °C para bosque de pino, bosque de pino, oyamel y aile y bosque de pino y oyamel, respectivamente. Por su parte, los valores medios de humedad edáfica oscilaron entre 0,11 y 0,21 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (cuadro 2).

Los resultados mostraron que la variación de la respiración edáfica se debió a los efectos de temperatura y humedad del suelo, estos efectos son más notorios comparados entre las temporadas del año, es decir, se observó que mientras la humedad es estable y la temperatura incrementa la respiración aumenta notoriamente (figura 2). Las variaciones en la respiración del suelo estuvieron dominadas

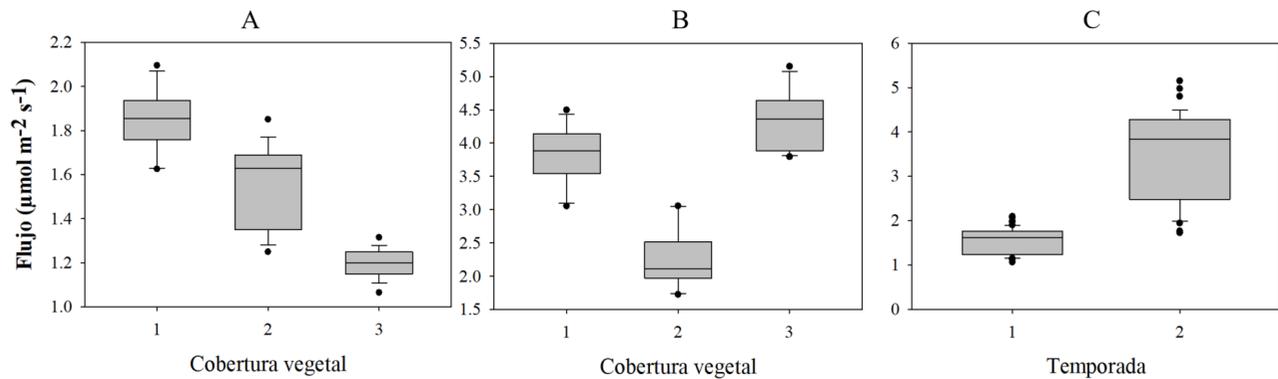


Figura 1. Diagramas de caja de variabilidad de la respiración del suelo por cobertura vegetal [(1) bosque de pino, (2) bosque de pino, oyamel y aile (3) en el eje X] para la temporada de invierno (A), $n = 51$, CV: 19,53 %, primavera (B), $n = 39$, CV: 28,67 % y por temporada del año [invierno (1) y primavera (2) en el eje X] (C), $n = 90$, CV: 50,08 %.

Box diagrams of soil respiration variability by plant cover [(1) pine forest, (2) pine, fir, and alder forest and, (3) pine and fir forest on the X axis] for the winter season (A), $n = 51$, CV: 19.53 %, spring season (B), $n = 39$, CV: 28.67 %, and both seasons [winter (1) and spring (2) on the X axis] (C), $n = 90$, CV: 50.08 %.

Cuadro 2. Respiración del suelo (Rs), temperatura del suelo (Ts) y humedad del suelo (Hs) según la cobertura vegetal y época del año.

Soil respiration (Rs), soil temperature (Ts) and soil humidity (Hs) by soil cover and season.

Temporada	Cobertura vegetal	Rs ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Ts (°C)	Hs ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
		Valor medio	Valor medio	Valor medio
Invierno	BP	1,85 ± 0,13 a	6,64 ± 0,48 a	0,13 ± 0,003 b
	BPOA	1,55 ± 0,18 b	6,65 ± 0,09 a	0,11 ± 0,002 c
	BPO	1,20 ± 0,06 c	5,91 ± 0,22 b	0,21 ± 0,003 a
Primavera	BP	3,84 ± 0,43 b	10,12 ± 0,23 b	0,14 ± 0,002 c
	BPOA	2,25 ± 0,43 c	10,90 ± 1,02 a	0,23 ± 0,002 a
	BPO	4,34 ± 0,44 a	10,57 ± 0,09 ab	0,21 ± 0,003 b

Nota: Para cada variable los valores medios con diferente letra son estadísticamente significativos para la prueba de Tukey ($P = 0,05$). BP: bosque de pino; BPOA: bosque de pino, oyamel y aile; BPO: bosque de pino y oyamel.

principalmente por la humedad, seguido de la temperatura o incluso por la combinación de ambas variables.

De acuerdo con Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test se rechazó el supuesto de que los datos son normales ($P < 0,05^*$). Como ya se mencionó, la respiración edáfica está controlada por la temperatura y hume-

dad del suelo, sin embargo, la prueba de correlación de Spearman mostró que para el caso de la estación primavera la correlación entre respiración y temperatura edáfica es baja, a diferencia de la estación invierno donde esta correlación es alta (cuadro 3). Esta prueba también reveló que las condiciones ambientales como la temperatura y

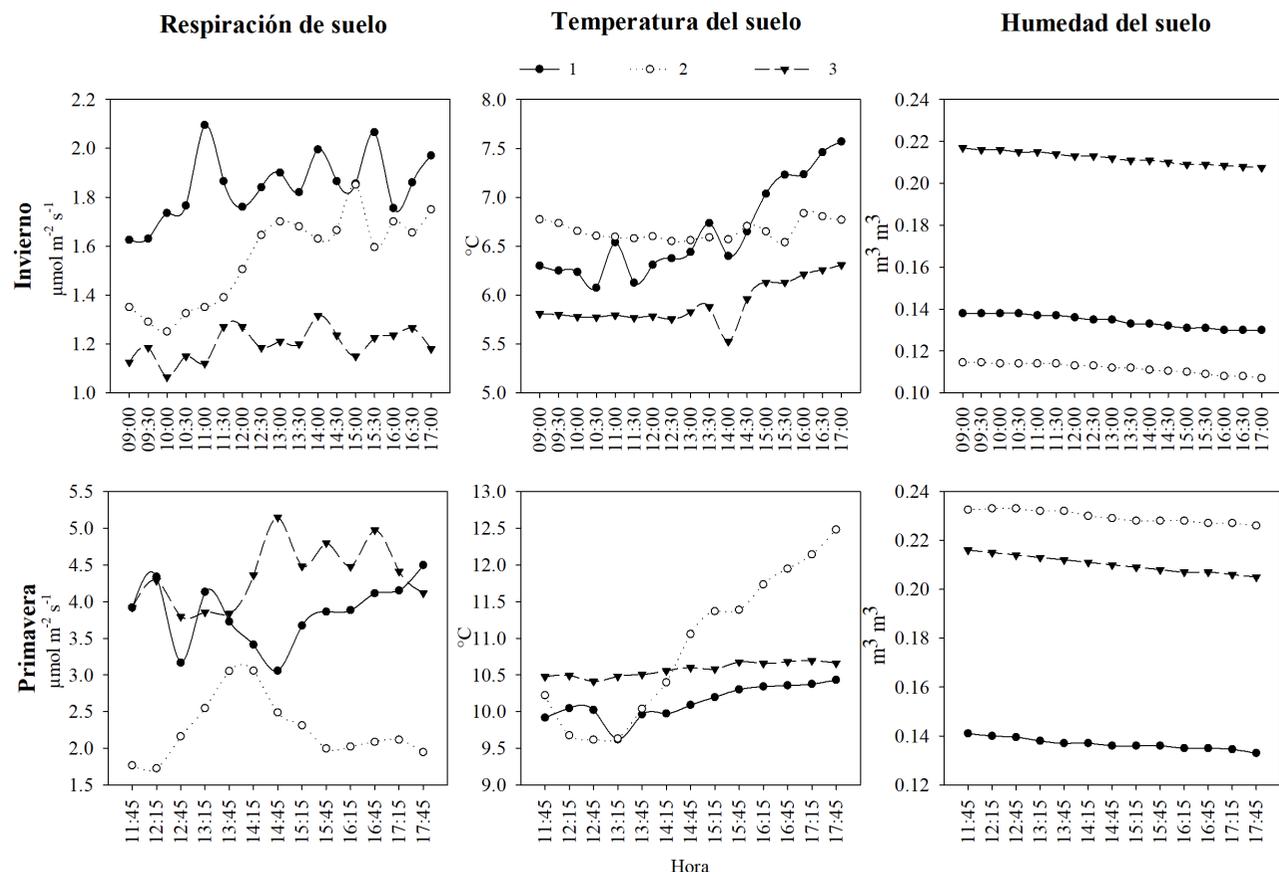


Figura 2. Variación de la respiración, la temperatura y la humedad del suelo por temporada y cobertura vegetal (bosque de pino (1), bosque de pino, oyamel y aile (2) y bosque de pino y oyamel (3)).

Variation of soil respiration, temperature and humidity per season and plant cover (pine forest (1), pine, fir, and alder forest (2) and, pine and fir forest (3)).

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Spearman para seis variables y temporada estudiada.

Spearman correlation coefficients from six variables and season.

Variable	Invierno	Primavera
	Flujo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	
Temperatura del suelo a 10 cm de profundidad	0,62	-0,10
Humedad del suelo a 10 cm de profundidad	-0,55	-0,68
Temperatura ambiente	0,63	-0,57
Humedad ambiental	0,60	0,60
Radiación solar	-0,10	-0,32

n = 540 valores

humedad ambiental están altamente correlacionadas con la respiración del suelo, lo que muestra que la influencia es alta a diferencia de la radiación solar, que se ha previsto que altera la medición de la respiración del suelo con el uso de cámaras.

DISCUSIÓN

Comparación espacial y temporal de la respiración del suelo. Los resultados de la presente investigación arrojaron valores más elevados de la respiración del suelo en la temporada de primavera a comparación del invierno. Lo anterior se debe a la mayor disponibilidad de agua y aumento en la temperatura del suelo, la cual a su vez aumenta la actividad microbiana (Yan *et al.* 2019). En la época de invierno la respiración edáfica ejerce un papel relativamente pequeño en la dinámica temporal en estos ecosistemas, lo que se relaciona con la disminución de procesos biológicos como la fotosíntesis de las plantas, la actividad microbiana y el crecimiento de raíces y micorrizas que cambian de manera coherente con la dinámica estacional de la temperatura (Oertel *et al.* 2016).

Estas variaciones concuerdan con otros estudios, en ecosistemas similares (Oertel *et al.* 2016) y diferentes (Campos 2014), que mencionan variación sustancial en la respiración del suelo dentro y entre sitios, así como por estaciones, respondiendo a las condiciones ambientales específicas del sitio (Bosque nuboso de montaña tropical y de coníferas en el volcán Cofre de Perote, México).

El flujo promedio de la respiración del suelo en la temporada invernal en ecosistemas similares a los estudiados en la presente investigación oscila entre 0,32 y 0,71 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a temperaturas debajo de los 0 °C con presencia de capas de nieve de hasta 20 cm (Gao *et al.* 2018). En los resultados obtenidos se observó valores más elevados (1,07 - 2,10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Lo anterior debido a que existe una relación directa con la temperatura del suelo que oscila entre los 5 y 7 °C. Por su parte, Cueva-Rodríguez *et al.* (2012) detallan que en un matorral xerófilo del estado de Sonora la respiración edáfica puede variar de 4 a 9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante los periodos húmedos, mientras que en periodos secos es menor a 0,5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Así mismo, Oertel *et al.* (2016) establecen que los datos promedio para climas templados durante la estación de crecimiento varían en un rango de 0,45 a 8,2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Similar a lo encontrado en este estudio durante la temporada de primavera donde oscila de 1,28 a 5,15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Lo anterior concuerda también con lo reportado por Han *et al.* (2018) durante cinco años de medición (2011 - 2015), quienes encontraron que la respiración del suelo media anual varía de 1,40 hasta 2,44 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y Arch-Miller y Samuelson (2016), quienes mencionan una variación de 1,18 a 5,94 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ambos en ecosistemas similares al del presente estudio.

Así pues, la variación en la respiración edáfica en bosques templados se puede explicar en respuesta a factores

bióticos y abióticos como el tipo de vegetación, edad de las plantas, el tipo de suelo y las condiciones climáticas. Además, el cambio de uso de suelo es uno de los principales factores que provocan aumentos considerables (Don *et al.* 2011) como demostrado por Hu *et al.* (2018) al estudiar el aumento en las emisiones de CO₂ en la conversión de un bosque natural a plantaciones de Bambú, efecto que se debió principalmente a la mineralización y consecuente disminución en secuestro de carbono al suelo.

De este modo, la influencia de la vegetación es un factor importante en la variación de la respiración edáfica, aunado con la interacción del tipo de bosque y la edad (Oertel *et al.* 2016). Lo anterior por la variabilidad en la fenología de los árboles y sus características fisiológicas (Han *et al.* 2018), resultado en diferencia en la cantidad de materia orgánica acumulada en la superficie del suelo, que al someterse a los aumentos de temperatura, inicia el proceso de oxidación aumentando la respiración del suelo (Buchmann 2000), al mismo tiempo que aumenta la actividad enzimática, lo que intensifica los procesos fisiológicos (como la respiración) de los organismos del suelo. El mismo autor reporta que la respiración microbiana domina en el flujo total de CO₂ del suelo en más del 70 %. Por otro lado, Gao *et al.* (2018) mencionan que las diferencias en las tasas de respiración edáfica son explicadas por la variabilidad en los microbios presentes en el suelo que varían de acuerdo con el tipo de vegetación presente.

Correlación entre respiración, temperatura y humedad del suelo. La temperatura y humedad del suelo varían significativamente con la profundidad del suelo y depende de varias características del sitio, por ejemplo, la exposición a la radiación y luz, la sombra o el viento (Oertel *et al.* 2016). La variación de la respiración del suelo puede deberse a la rehumectación de suelos secos, que provoca la desgasificación del suelo en donde el agua va sustituyendo al aire que se encuentra en los micro y macro poros (Cueva *et al.* 2012, Oertel *et al.* 2016).

Así pues, los resultados de esta investigación refuerzan que la temperatura y humedad del suelo tienen efecto con el comportamiento de la respiración del mismo, al igual que las diversas condiciones ambientales; coincidiendo con Arch-Miller y Samuelson (2016), Han *et al.* (2018). Se observó que la respiración edáfica en los diferentes rodales siguió la tendencia estacional positiva de la temperatura del suelo y aumentó exponencialmente con el aumento de esta. De acuerdo con Han *et al.* (2018) la humedad edáfica presenta un fuerte impacto en la respiración del suelo durante las sequías, lo que explica la correlación negativa entre estos dos factores para ambas temporadas en este estudio ya que no se observó gran variación estacional en los datos de esta variable.

Las condiciones climáticas durante la temporada de crecimiento latente o temprana podrían determinar las tasas anuales de respiración del suelo en los ecosistemas de bosques templados (Oertel *et al.* 2016).

CONCLUSIONES

El comportamiento de la respiración del suelo de las diferentes coberturas vegetales medidas es variable de acuerdo con la temporada del año. Sin embargo, se observa que la respiración del suelo es mayor durante la temporada más calurosa (primavera) en comparación con la temporada más fría (invernal). Por lo que se asume una variabilidad estacional y espacial en los tres ecosistemas templados estudiados. En la temporada invernal el bosque de pino tiene la tasa más alta de respiración edáfica y el bosque de pino y oyamel la menor. En primavera, el bosque de pino y oyamel es el que presentó mayor respiración edáfica mientras que el bosque de pino, oyamel y aile resultó con la menor. Por otro lado, los resultados muestran que la variación en las tasas de respiración del suelo está influenciada principalmente por la combinación de temperatura y humedad del suelo, además de la influencia de la temperatura y humedad ambiental.

De acuerdo con los resultados presentados, los objetivos planteados para la investigación fueron cumplidos de manera integral, mientras que la hipótesis “a) la respiración del suelo es mayor en coberturas vegetales mixtas en comparación de masas puras” se rechaza, debido a que esto depende enteramente de la temporada del año en la que los datos fueron tomados ; mientras que la hipótesis “b) la respiración del suelo será mayor durante la temporada más calurosa (primavera) en comparación con la temporada más fría (invernal)” se acepta, ya que los valores de respiración del suelo mayores fueron los obtenidos durante la época más calurosa, como se expone en el párrafo anterior.

Con los resultados presentados en la presente investigación es posible contar una línea base para estimar las tasas de emisiones de CO₂ por año según los tipos de ecosistemas forestales. De modo que se puede considerar como un primer acercamiento para incluir estas emisiones de CO₂ a la cuantificación total nacional y con ello, se permita ser más específicos en los factores de cálculo de las emisiones. Sin embargo, también es necesario continuar estudiando las dinámicas de respiración en comunidades vegetales a largo plazo para contar con resultados más estables y precisos.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca otorgada en el programa de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales. A la Universidad Autónoma Chapingo, la División de Ciencias Forestales y al Departamento de Suelos. Así mismo, a los revisores anónimos cuyos comentarios ayudaron a mejorar el manuscrito.

REFERENCIAS

ArchMiller A, LJ Samuelson. 2016. Intra-annual variation of soil respiration across four heterogeneous longleaf pine forests in the southeastern United States. *Forest Ecology and Man-*

agement 359: 370-380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.016>

Báez A, S Pajares, JD Etchevers, JF Gallardo. 2006. Emisión de CO₂ en sustratos volcánicos del estado de México y Tlaxcala. 9 p.

Buchmann N. 2000. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology & Biochemistry* 32: 1625-1635. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00077-8)

Campbell JL, BE Law. 2005. Forest soil respiration across three climatically distinct chronosequences in Oregon. *Biogeochemistry* 73(1): 109-125. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-004-5165-9>

Campos CA. 2014. Trends in soil respiration on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (Mexico): Environmental contributions. *Catena* 114: 59-66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.010>

Chávez-Salcedo LF, ME Queijeiro-Bolaños, V López-Gómez, Z Cano-Santana, BE Mejía-Recamier, A Mojica-Guzmán. 2018. Contrasting arthropod communities associated with dwarf mistletoes *Arceuthobium globosum* and *A. vaginatum* and their host *Pinus hartwegii*. *Journal of Forestry Research* 29(5): 1351-1364. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0544-y>

Covaleda S, C Prat, F Garcia-Oliva, JD Etchevers, JF Gallardo, F Paz. 2009. Flujos de CO₂ edáfico en un transecto de bosques de pino-encino afectados por actividad antrópica en la microcuena de Atecuaro (Michoacan, Mejico). In Gallardo Lancho JF, J Campo Alves, ME Conti eds. Emisiones de gases con efecto invernadero en ecosistemas iberoamericanos: Red Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Salamanca, España. Consultado ene. 2021. Disponible en <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010049867>.

Cueva-Rodríguez A, EA Yépez, J Garatuzza-Payán, CI Watts, JC Rodríguez. 2012. Diseño y uso de un sistema portátil para medir la respiración de suelo en ecosistemas. *Terra Latinoamericana* 30(4): 327-336.

Don A, J Schumacher, A Freibauer. 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. *Global Change Biology* 17(4): 1658-1670. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>

Gao D, B Peng, Z Fan, G Pei, E Bai. 2018. Different winter soil respiration between two mid-temperate plantation forests. *Forest Ecology and Management* 409(72): 390-398. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.029>

Han M, B Shi, G Jin. 2018. Conversion of primary mixed forest into secondary broadleaved forest and coniferous plantations: Effects on temporal dynamics of soil CO₂ efflux. *Catena* 162(2012): 157-165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.004>

Hu S, Y Li, SX Chang, Y Li, W Yang, W Fu, J Liu, P Jiang, Z Lin. 2018. Soil autotrophic and heterotrophic respiration respond differently to land-use change and variations in environmental factors. *Agricultural and Forest Meteorology* 250-251: 290-298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.003>

Lomas-Barrié CT, S Terrazas-Domínguez, H Tchikoué-Maga. 2007. Propuesta de ordenamiento ecológico territorial para el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente* 11(1): 57-71. DOI: <https://chapingo.mx/revistas/forestales>

- López Santos A, JA Gil Marín. 2008. Flujos de CO₂ y le medidos con cámaras de intercambio de gas y sensores de ir bajo condiciones de cielo abierto. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* 7: 1-5.
- Oertel C, J Matschullat, K Zurba, F Zimmermann, S Erasmí. 2016. Greenhouse gas emissions from soils - A review. *Chemie Der Erde - Geochemistry* 76(3): 327-352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
- Paredes-Gonzalez A, AI Monterroso-Rivas, LJ Rodríguez-Esparza, FJ Zamudio-Sánchez. 2018. Projection and probability of land use change in Zoquiapan, Mexico: considerations for forest management. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente* 24(1): 59-71. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.07.041>
- Raich JW, W Schlesinger. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* 44 B(2): 81-99.
- Ramos M, JD Díaz Gómez, AI Monterroso Rivas, M Uribe Gómez, BDJ Villar Hernández, P Ruiz García, C Asencio. 2020. Factores que influyen en la erosión hídrica del suelo en un bosque templado. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(59). DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.673>
- Ryan MG, BE Law. 2005. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry* 73(1): 3-27. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-004-5167-7>
- Santini NS, MF Adame, RH Nolan, Y Miquelajauregui, D Piñero, A Mastretta-Yanes, AP Cuervo-Robayo, D Eamus D. 2019. Storage of organic carbon in the soils of Mexican temperate forests. *Forest Ecology and Management* 446: 115-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.029>
- Waheed R, D Chang, S Sarwar, W Chen. 2018. Forest, agriculture, renewable energy, and CO₂ emission. *Journal of Cleaner Production* 172: 4231-4238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.287>
- Wang C, Y Han, J Chen, X Wang, Q Zhang, B Bond-Lamberty. 2013. Seasonality of soil CO₂ efflux in a temperate forest: Biophysical effects of snowpack and spring freeze-thaw cycles. *Agricultural and Forest Meteorology* 177: 83-92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.008>
- Yadav D, J Wang. 2017. Modelling carbon dioxide emissions from agricultural soils in Canada. *Environmental Pollution* 230: 1040-1049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.066>
- Yan T, H Song, Z Wang, M Teramoto, J Wang, N Liang, C Ma, Z Sun, Y Xi, L Li, S Peng. 2019. Sensitivity of soil respiration across multiple time scales in a temperate plantation forest. *688(5): 479-485*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.318>

Recibido: 25.01.21
Aceptado: 16.06.22

