



Respiración del suelo

en un bosque templado de México y su relación con el carbono orgánico

Soil respiration in temperate forest ecosystems of Mexico and its relationship with organic carbon

Yadihra Cruz-Sánchez^{1*}, Leticia C. López-Teloxa², Jesús D. Gómez-Díaz³ y Alejandro I. Monterroso-Rivas³

¹ Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, Estado de México, México.

³ Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. Chapingo, Estado de México, México.

* Autor de correspondencia. yaridd04@gmail.com

² Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Fitotecnía. Chapingo, Estado de México, México.

RESUMEN

Los ecosistemas forestales desempeñan un papel importante en el ciclo global del carbono disminuyendo el efecto invernadero a través de su captura y fijación. Diversos autores han estudiado la interacción entre carbono orgánico y respiración del suelo, pero es importante aumentar la información en ecosistemas templados. Los objetivos del presente trabajo fueron analizar la variación espaciotemporal de la respiración y el carbono orgánico del suelo, así como la influencia de factores ambientales sobre la respiración del suelo en un bosque templado de México. Se obtuvieron datos de carbono orgánico del suelo para cuatro rodales, determinados por tipo de vegetación y tres profundidades, mediante un analizador de carbono orgánico. La respiración del suelo se muestreó con un analizador de gases infrarrojo en cuatro rodales y cuatro temporadas (mayo de 2019 - enero de 2020). Se tomaron datos de temperatura y humedad del suelo e información de dos estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de estudio. El carbono orgánico del suelo varió de 163.09 Mg ha⁻¹ a 207.45 Mg ha⁻¹ almacenando más carbono en rodales de masas mixtas. La respiración del suelo fluctuó entre 39.27 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y 67.96 Mg ha⁻¹ año⁻¹ con mayores cantidades emitidas en rodales de masas puras. El carbono orgánico del suelo presentó una correlación negativa con la respiración del suelo. Los cambios en la respiración del suelo sugieren una fuerte dependencia al escenario ambiental debido a una interacción del clima y tipo de vegetación, dependiendo de las características propias de la época del año y del rodal.

PALABRAS CLAVE: bosque de pino, bosque de oyamel, CO₂, emisiones forestales, suelos forestales.

ABSTRACT

Forest ecosystems play an influential role in the global carbon cycle, decreasing the greenhouse effect through capture and fixation processes. Many studies have analyzed the interaction between organic carbon and soil respiration, but it is important to increase the information in temperate ecosystems. The main goal of the present study was to evaluate the spatial-temporal variation of soil respiration and organic carbon in soil and to assess the influence of environmental factors on soil respiration. Soil organic carbon data for four stands, determined by vegetation type and three different depths were obtained using an organic carbon analyzer. Soil respiration was sampled with an infrared gas analyzer in four stands and four seasons of the year (May 2019 - January 2020). In addition, soil temperature, soil humidity data, and climatological information were taken from two meteorological stations located within the study area. Soil organic carbon ranged from 163.09 Mg ha⁻¹ to 207.45 Mg ha⁻¹ storing more carbon in stands of mixed forests. Soil respiration fluctuated between 39.27 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ and 67.96 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ with higher amounts emitted in pure or natural forests. Soil organic carbon correlated negatively with soil respiration. Changes in soil respiration suggest a strong dependence on the environmental scenario due to an interaction of the climate and vegetation type, varying on the characteristics of the time of year and the stand.

KEYWORDS: pine forest, fir forest, CO₂, forest emissions, forest soils.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales pueden absorber cantidades significativas de dióxido de carbono (CO_2) (Yáñez Sandoval, 2004). Para el año 2015, en México la categoría “tierra” (abarca tierras forestales y tierras de cultivo que permanecen como tales y tierras convertidas a tierras de cultivo), que incluye suelo y vegetación del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (Inegyci), se comportó como un sumidero de gases de efecto invernadero (GEI). Las absorciones de CO_2 (emisiones negativas) de esta categoría alcanzaron 148 Tg, de los cuales las tierras forestales, que permanecen como tales, por sí solas absorbieron 138 Tg (Mendiola Patiño y de Buen Richkarday, 2018). Los ecosistemas forestales juegan un papel importante en el ciclo global del carbono ya que tienen la capacidad de disminuir el efecto invernadero a través de los procesos de captura y fijación de carbono (C), pues de acuerdo con Anderson-Teixeira *et al.* (2018) almacenan aproximadamente la mitad del carbono terrestre e intercambian anualmente con la atmósfera más de cinco veces el dióxido de carbono emitido por las actividades antropogénicas. Estos sumideros terrestres de C (ecosistemas forestales), lo almacenan en la vegetación viva, en la materia orgánica en descomposición y en el suelo, así como en sus productos (maderables y no maderables, combustibles fósiles no usados, etc.), de manera que los flujos o emisiones de C están dados por la degradación de dichos ecosistemas y sus productos (Yáñez Sandoval y Vargas Mena, 2004). A escala global, Paz, Argumedo, Cruz, Etchevers y Jong (2016) mencionan que para ecosistemas terrestres mexicanos, en el primer metro de profundidad, existen diferentes concentraciones del carbono en los suelos; algunos organismos internacionales han estimado que los suelos en esa capa almacenan un valor promedio de 1500 Pg de carbono. Por su parte, Carré *et al.* (2010) estiman que, en biomasa viva y muerta, se almacenan 456 Pg.

Dentro del balance del carbono, un factor importante es la emisión de CO_2 desde suelo o respiración del suelo (R_s) (Chen, Xu, Fan, Yu y Ding, 2017). Dentro de un sistema forestal, la R_s es la suma de la respiración

heterotrófica (microbios, fauna del suelo) y la autotrófica (raíz) (Hanson, Edwards, Garten y Andrews, 2000). La cuantificación precisa de la R_s tanto diurna como estacional, es crucial para una interpretación correcta de sus variaciones ante los factores bióticos y abióticos, así como para estimar la R_s anual en sistemas forestales (Brændholt, Steenberg Larsen, Ibrom y Pilegaard, 2017). Los cambios ambientales (factores abióticos) causan importantes variaciones en la R_s ; por lo tanto, para entenderlos es necesario identificar los factores que causan impacto potencial en los sistemas forestales y sus efectos en las tasas de emisión (Ramírez Palacio y Moreno Hurtado, 2008).

Si bien se sabe que la temperatura, la humedad y otras características abióticas regulan la tasa de R_s a escala de parcela dentro de ciertos biomas (Huish *et al.*, 2017), poco se conoce acerca de los efectos de la diversidad de plantas y la retribución del carbono edáfico sobre la R_s . La tasa de acumulación de carbono en el suelo derivada de los cambios de entrada de la materia orgánica en él se deberían tener en cuenta para las estimaciones de la R_s global (Adachi, Ito, Yonemura y Takeuchi, 2017). Por lo anterior, las pérdidas de materia orgánica del suelo por oxidación podrían contribuir al aumento de CO_2 atmosférico y exacerbar el calentamiento global; por otro lado, los aumentos en la materia orgánica del suelo podrían retrasar el aumento del CO_2 atmosférico y proporcionar una retroalimentación negativa al calentamiento global (Schlesinger, 1995). Así pues, la R_s está relacionada con la cantidad de aporte de carbono al suelo y las reservas de carbono del suelo (Chen *et al.*, 2017). La vegetación entonces afecta a la R_s a través de la respiración y exudación de la raíz, así como de la producción de residuos vegetales como caída de hojarasca, que es la principal fuente de carbono orgánico del suelo (COS). Se ha encontrado que, a escala mundial, la producción anual de residuos vegetales está positivamente correlacionada con el COS y la R_s (Xu y Shang, 2016).

Los bosques templados de México son importantes por los servicios ambientales que brindan, como el secuestro de carbono, la conservación y la prevención de la erosión del suelo, la regulación del microclima, la



protección del hábitat de la vida silvestre y la infiltración de agua de lluvia en el suelo, que puede reponer los acuíferos. Sin embargo, debido a la deforestación y a la conversión del uso de la tierra a la agricultura, la ganadería y los usos urbanos, la cobertura de estos bosques ha disminuido. El Parque Nacional Zoquiapan y Anexas es un área natural protegida que forma parte del corredor biológico Popocatepetl-Iztaccíhuatl. En el parque, está la Estación Experimental Zoquiapan perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo (EFEZ), que cuenta con una extensión importante de bosque conservado con características geográficas y ecológicas descriptivas del área y representa la principal fuente de datos del parque (Lomas-Barrié, Terrazas-Domínguez y Tchikoué-Maga, 2007).

Varios estudios refieren la importancia del COS y de la Rs en diferentes coberturas vegetales y momentos del año Liu, Peng, Tan, Guo y Zhang, 2021; Z. Liu, Shi, Wei y Zhang, 2022; López-Teloxa y Monterroso-Rivas, 2020; Propa, Hossain y Ahmed, 2021). Sin embargo, incrementar la información existente de las reservas y flujos de carbono de los bosques que permitan comprender el ciclo global del carbono y su sensibilidad climática sigue siendo un desafío importante.

OBJETIVOS

Los objetivos de la presente investigación fueron: a) analizar la variación espacial y temporal de la Rs y el COS en cuatro diferentes condiciones dentro de un bosque templado de México, así como b) evaluar la influencia de factores ambientales y del suelo como temperatura, humedad, velocidad del viento y radicación solar sobre las tasas de Rs.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en un bosque templado perteneciente al Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, localizado dentro de la provincia fisiográfica Cordillera Neovolcánica y ubicado en el Estado de México, en el centro de México. En 1935, los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl fueron

declarados parque nacional, incluyendo el área comprendida a partir de los 3000 m s.n.m., sus límites fueron redefinidos en 1992, quedando considerado el parque a partir de los 3600 m s.n.m. (Acosta Mireles, Carrillo Anzures, Delgado y Velasco Bautista, 2014). Dentro del área del parque se encuentra la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), coordenadas 19°14' y 19°18' latitud Norte y 98°38' y 98°42' longitud Oeste (Fig. 1), sitio destinado a investigación y monitoreo permanente de ecosistemas templados (Lomas-Barrié, Terrazas-Domínguez y Tchikoué-Maga, 2007). El intervalo altitudinal de la EFEZ va de 3080 m a 3670 m s.n.m. El clima dominante es semifrío del grupo de los templados con verano fresco y largo, la precipitación anual varía de 1000 mm a 1500 mm, la temporada de lluvias es de mayo a octubre, y la estación seca de noviembre a abril; la temperatura media está entre 10 °C y 14 °C (Paredes-Gonzalez, Monterroso-Rivas, Rodríguez-Esparza y Zamudio-Sánchez, 2018). Los tipos dominantes de vegetación encontrados en esta área son el bosque de *Pinus*, *Abies* y *Quercus*; mientras que el sotobosque está representado por pastos como *Muhlenbergia macroura*, *M. quadridentata* y *Festuca tolucensis* (Chávez-Salcedo *et al.*, 2018). La textura del suelo en la zona de estudio es clasificada como Franco-arenosa (Matías Ramos *et al.*, 2020). El origen volcánico es dominante, con clase ígnea extrusiva, derivando en suelos profundos de tipo andosol (Paredes-Gonzalez *et al.*, 2018).

Diseño experimental

Se eligieron al azar cuatro rodales dentro de la EFEZ y fueron geoposicionados con GPS (Garmin Etrex 10). Para establecer el número de rodales se consideró el tipo de vegetación presente en área, estableciendo un rodal por tipo de vegetación: bosque de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. (oyamel) (BA), Bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. (pino de las alturas) (BP), Bosque de *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa* y *Alnus firmifolia* Fernald (aile) (BPAA) y Bosque de *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa* (BPA). En cuanto a la edad del arbolado del sitio, a partir de datos tomados en campo, se

puede referir que hay 13 clases de edad de 10 años para los rodales de *Abies religiosa* y nueve clases para el *Pinus hartwegii*.

El estudio se llevó a cabo de mayo de 2019 a enero de 2020. Para determinar la variabilidad natural espacial del COS se tomaron un total de 36 muestras de suelo; se seleccionaron cuatro sitios al azar dentro cada rodal, por lo que se generaron 12 repeticiones de suelo a 3 diferentes

profundidades (0 cm - 10 cm, 10 cm - 20 cm y 20 cm - 30 cm), para cada rodal. Para calcular la Rs se consideraron la variabilidad espacial y temporal. La información se tomó durante ocho horas en cada rodal (cuatro días), en cada temporada del año: Primavera (finales de mayo), verano (finales de agosto), otoño (principios de noviembre) e invierno (finales de enero).

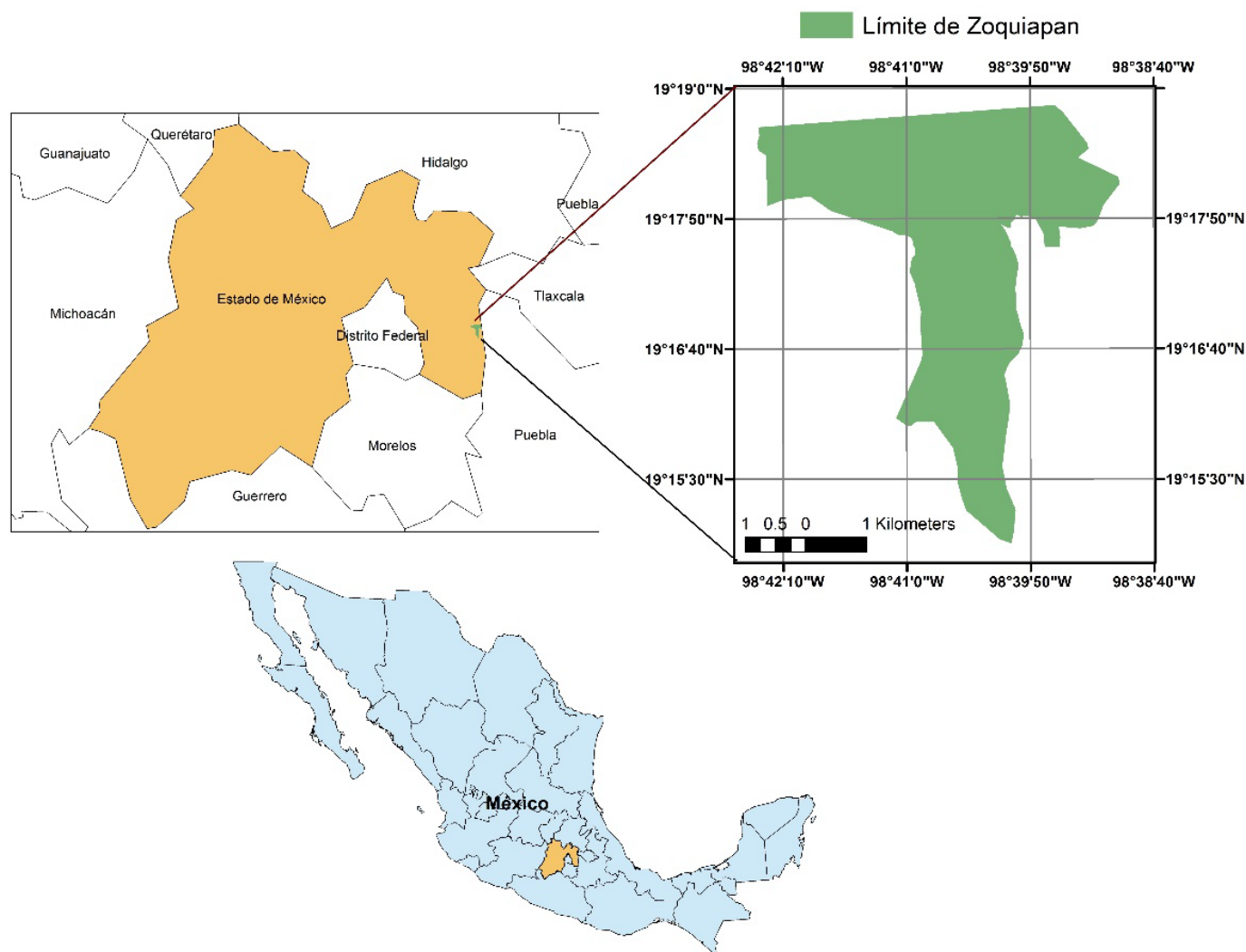


FIGURA 1. Mapa de ubicación geográfica de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), dentro del parque nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Estado de México, México.



Carbono orgánico almacenado en el suelo

Para determinar el COS se siguió la metodología de Etchevers *et al.* (2005), la cual consiste en toma de muestras inalteradas a tres profundidades: 0 cm - 10 cm, 10 cm - 20 cm y 20 cm - 30 cm (de aquí en adelante, estas tres profundidades se denominarán: 0-10, 10-20 y 20-30) con una barrena compuesta por dos anillos de diámetro 5.3 cm y altura de 2.9 cm, por lo que el volumen de suelo calculado por cada anillo es de 63.98 cm³. Las muestras se secaron a temperatura ambiente y se pasaron por un tamiz con de 0.150 mm de abertura. Para obtener la densidad aparente (Dap) se pesó la muestra de suelo completa (seca) y se separaron y pesaron piedras y raíces. El volumen estimado ocupado por piedras se usó como un factor de corrección para el cálculo de contenido de COS. El porcentaje de carbono orgánico (CO) fue determinado con un analizador de carbono orgánico total (TOC-L, Shimadzu Labs., Columbia, Maryland, EUA) equipado con un módulo de muestras sólidas (modelo SSM-5000A, Shimadzu Labs., Columbia, Maryland, EUA). El COS almacenado en las tres profundidades (espesor de 10 cm en cada intervalo de profundidad) fue calculado utilizando las siguientes ecuaciones (Etchevers *et al.*, 2005):

$$Pss = Dap \times V \quad (1)$$

Donde:

Pss = peso seco de l suelo contenido en una capa de 10 cm de espesor en una superficie de 1 ha (Mg m⁻³)

V= volumen de una capa de suelo de 10 cm de espesor en una superficie de 1 ha = 1000 m³ ha⁻¹

$$COS = (CO (\%) \times Pss) / 100 \quad (2)$$

Donde:

COS = carbono orgánico almacenado en cada capa de suelo de 10 cm de espesor en 1 ha de superficie (Mg ha⁻¹)

CO = porcentaje de carbono orgánico en las muestras de suelo

Respiración del suelo y variables ambientales

La Rs se obtuvo mediante un sistema de cámara cerrada equipada con un analizador de gases infrarrojo (IRGA, por sus siglas en inglés) y una cámara de medición de flujos de CO₂ del suelo modelo LI-COR 8100A (LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA) (Fig. 2).

En cada rodal se colocó un anillo de PVC a una profundidad de 5 cm con el fin de disminuir la perturbación del suelo. Estos anillos se colocaron 24 horas antes de cada medición. La toma de datos se realizó desde las 09:00 horas hasta las 17:00 horas, con dos repeticiones cada media hora durante 90 segundos con 30 segundos de banda muerta, una prepurga de 60 segundos y una pospurga de 30 segundos. Lo anterior para prevenir el error de flujo y acumulación de CO₂ que se acumula dentro de la cámara durante la medición (López-Teloxa, Monterroso-Rivas y Gómez-Díaz, 2020).

Paralelamente a cada medición de Rs se registraron datos diarios de la temperatura (Ts) y la humedad (Hs) del suelo a 10 cm de profundidad cada media hora, con dos sensores incluidos en la cámara modelo 8100-201 Soil Temperature Probe, Lincoln, Nebraska USA y 8100-204 Theta Soil Moisture Probe, Lincoln, Nebraska USA, respectivamente. Además, se obtuvo información de dos estaciones meteorológicas automáticas de la marca Davis 6162 modelo Vantage Pro2 Plus, Hayward, CA, USA inalámbrica ubicadas dentro del área de estudio. Los datos obtenidos fueron: temperatura ambiente (Ta), humedad relativa (Hr), velocidad del viento (Vv) y radiación solar (R). Estas variables fueron consideradas para buscar su relación con la Rs para evaluar su efecto.

Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas completamente al azar para la Rs, teniendo en cuenta cuatro tratamientos (estaciones del año) y como factor de efecto aleatorio el tiempo de medición. Lo anterior para cada rodal estudiado. Se consideró el criterio de información de Akaike (AIC) y el modelo que mejor explicó los datos fue el *First Order Autorregresive* (ar(1)). Los

datos de COS, T_s , H_s y factores ambientales (T_a , H_r , V_v y R) se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) para comprobar que existen diferencias significativas de acuerdo con el rodal estudiado (para el caso del COS) y entre temporadas del año (para T_s , H_s y factores ambientales). El índice de correlación de Pearson se utilizó para probar la interacción entre T_s , H_s y las variables ambientales (T_a , H_r , V_v y R) con la R_s , considerando que los valores cercanos a la unidad son positivamente correlacionados, es decir, conforme aumenta el valor de una covariable, aumenta también la R_s , mientras que la relación inversa o negativa (cercano a -1) se da cuando una de las variables aumenta y la otra disminuye. Todos los análisis se hicieron con el software SAS (Statistical Analysis System) versión 9.4 (SAS Institute, 2002).

RESULTADOS

Carbono orgánico y respiración del suelo

La tabla 1 resume los valores medios obtenidos de COS, el cual presenta variabilidad entre los rodales muestreados, es decir, se observan diferencias espaciales significativas ($p < 0.05$). Las concentraciones más altas corresponden a BPAA $>$ BPA $>$ BP $>$ BA, con una variación de 44.36 Mg ha^{-1} entre el valor más alto y el más bajo de COS.

La cantidad de COS disminuye a medida que aumenta la profundidad del suelo ($p < 0.05$). Para todos los rodales la capa superior (0-10) almacena la más alta concentración de COS (Fig. 3).



FIGURA 2. Medición de R_s con equipo LI-COR en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), dentro del parque nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Estado de México, México



TABLA 1. Carbono orgánico edáfico (COS) de horizonte de 0 cm - 30 cm, respiración anual del suelo (R_s) y condiciones del terreno de los rodales muestreados en el bosque templado de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), dentro del parque nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Estado de México, México (valores medios y desviación estándar).

Rodal	Variable				
	COS (Mg ha ⁻¹)	R_s (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Pendiente (%)	Altitud (m)	Orientación
BPAA	207.45 ± 19.6	39.27 ± 3.4	9	3318	Oeste
BPA	183.00 ± 23.1	47.69 ± 5.4	7	3336	Norte
BP	169.06 ± 29.7	67.96 ± 4.4	6	3297	Noreste
BA	163.09 ± 53.8	55.77 ± 7.9	17	3324	Este

BPAA: bosque de *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa* y *Alnus firmifolia*; BPA: bosque de *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa*; BA: bosque de *Abies religiosa*; BP: *Pinus hartwegii*

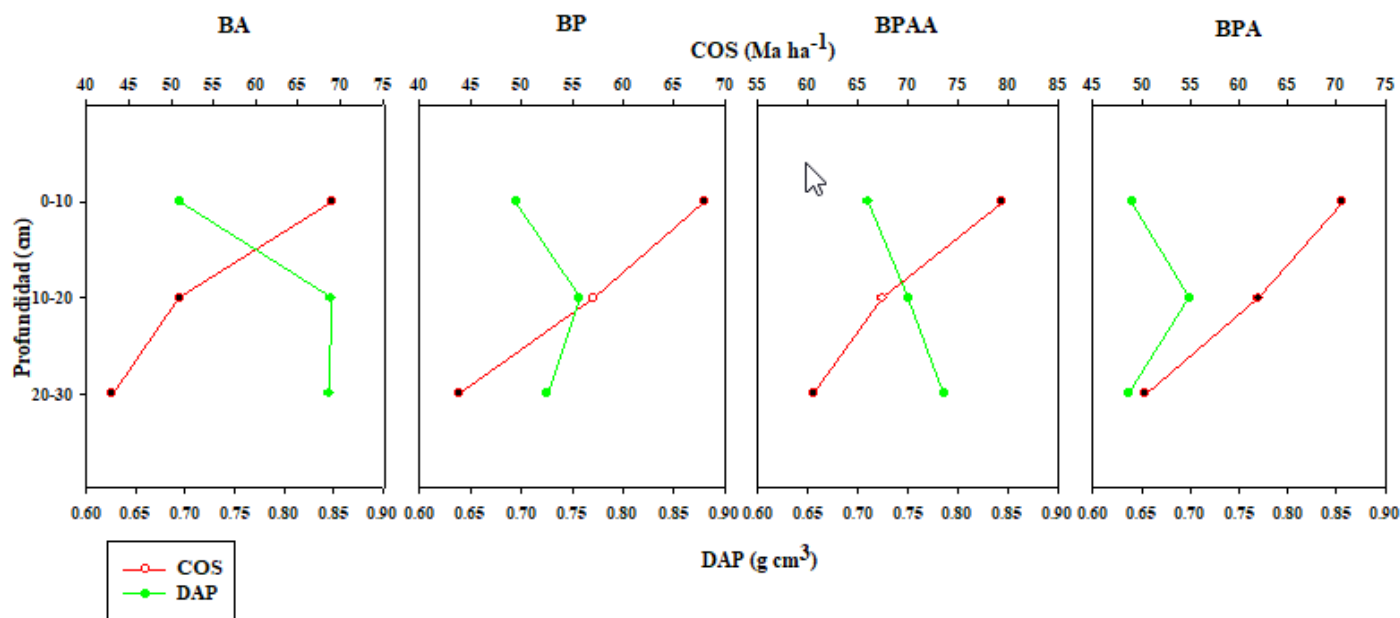


FIGURA 3. Variación espacial de carbono orgánico edáfico y densidad aparente por profundidad en los sitios estudiados en el bosque templado de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), dentro del parque nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Estado de México, México.

Por su parte, la tasa anual de la respiración del suelo (R_s) difiere significativamente entre los cuatro rodales ($p < 0.05$). El orden de los cuatro rodales en cuanto a la R_s es $BP > BA > BPA > BPAA$, como puede observarse en la tabla 1.

La R_s para las cuatro estaciones del año fluctúa de 9.08 a 29.51 g m⁻²día⁻¹ para BA, de 15.81 a 27.34 g m⁻²día⁻¹ para

BP, de 8.46 a 17.50 g m⁻²día⁻¹ para BPAA y de 4.83 a 18.85 g m⁻²día⁻¹ para BPA. La tasa máxima de R_s se observó en BA y BP durante la temporada de verano; mientras que para BPAA y BPA durante la temporada de otoño. Las tasas mínimas de R_s se observaron para BA y BP durante la primavera y para BPAA y BPA durante el invierno (Fig. 4).

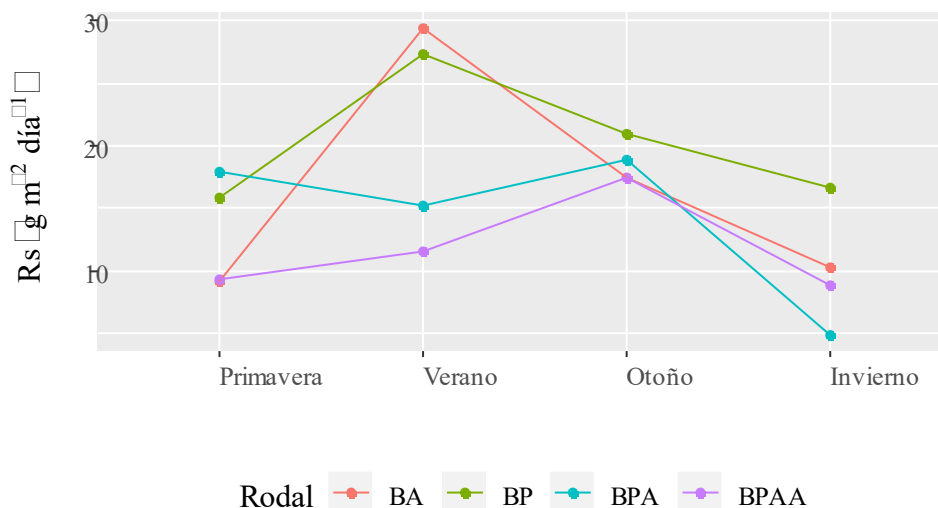


FIGURA 4. Variación estacional de la respiración del suelo en los sitios estudiados en el bosque templado de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), dentro del parque nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Estado de México, México.

BPAA: bosque de *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa* y *Alnus firmifolia*; BPA: bosque de *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa*; BA: bosque de *Abies religiosa*; BP: bosque de *Pinus hartwegii*.

En este tipo de ecosistemas al aumentar la cantidad de COS la R_s disminuye; es decir, existe correlación estadísticamente significativa entre la R_s y el COS ($r^2 = 0.76$), de acuerdo con la regresión lineal (Fig. 5).

Efecto de los factores ambientales y del suelo sobre la respiración del suelo

A lo largo del periodo de muestreo las temperaturas del suelo (T_s) presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) con una variación de 5.1 °C. Durante las temporadas de primavera y verano, se registró la T_s más alta y la más baja fue durante el invierno. Las fluctuaciones de esta, para las cuatro temporadas, se dieron de 3.5 °C hasta 15.6 °C. La humedad media del suelo (H_s), al igual que la T_s , mostró diferencias significativas ($p < 0.05$). Para las cuatro estaciones la variación de la H_s fue de 0.18 m³ m⁻³ a 0.43 m³ m⁻³. Los valores más altos de H_s se registraron en verano y el mínimo en primavera, como se observa en la tabla 2.

Por otro lado, las variables ambientales T_a , H_r , V_v presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo con la temporada del año. La radiación solar no mostró diferencias entre temporadas del año; sin embargo, en

primavera fue más intensa y menor durante el otoño. De acuerdo con la T_a , primavera fue la estación más calurosa e invierno la más fría, mientras que el verano y el otoño presentaron la misma humedad relativa (H_r) siendo las temporadas más húmedas del año estudiado y el invierno la más seca. Para el caso de la velocidad del viento (V_v) en otoño se presentaron los vientos más fuertes, caso contrario del verano donde fueron más apacibles (Tabla 2).

Las variables ambientales y del suelo tienen influencia en la R_s , de acuerdo con el análisis de correlación de Pearson (Tabla 3). Cabe resaltar que la temporada del año influye en las correlaciones. Durante el verano, la R_s está influenciada principalmente por T_s y H_s . Mientras que en primavera e invierno la T_a y H_r causan mayor efecto sobre la R_s . La V_v y R muestran más correlación en la temporada de invierno. El resto de las correlaciones son bajas; sin embargo, de manera general se observa que existe cierta vinculación en el comportamiento de la R_s y todas las condiciones climáticas del sitio y del suelo analizadas (Tabla 3). Diversos estudios mencionan que la R_s está influenciada directamente por las estaciones del año y sus particularidades en el clima, principalmente la T_s y el



contenido de agua en el suelo (Jeong, Eom, Park, Chun y Lee, 2018; Rayment y Jarvis, 2000; Melillo *et al.*, 2017; Hicks Pries, Castanha, Porras, Phillips y Torn, 2018)

DISCUSIÓN

Almacén de carbono orgánico del suelo

En este estudio, el contenido de carbono orgánico almacenado en suelo tuvo diferencias significativas tanto espacialmente (BA, BP, BPAA y BPA), como entre profundidades del suelo ($P < 0.05$). Lo anterior, ocurre por la interacción de procesos geomórficos y bióticos, la variabilidad espacial del COS, la profundidad del suelo o la densidad aparente (González-Molina, Etchevers-Barra y Hidalgo-Moreno, 2008).

Los valores obtenidos de COS en este estudio ($163.09 \text{ Mg ha}^{-1}$ a $207.45 \text{ Mg ha}^{-1}$) están por debajo del intervalo mencionado por Galicia *et al.* (2016) para bosques del campo volcánico de la Sierra del Chichinuatzin (Faja Volcánica Trans Mexicana), donde se registra una acumulación de carbono orgánico total en el Solum de entre 370 Mg ha^{-1} y 540 Mg ha^{-1} . Y valores aún más bajos fueron observados por Solís Hernández, Luna Nájera, Méndez

González, Vargas Larreta y Álvarez Gallegos (2014), quienes obtuvieron diferencias significativas con valores de COS de $174.28 \text{ Mg ha}^{-1}$, que fueron determinados con valores extremos desde 89.14 Mg ha^{-1} para los primeros 10 cm de profundidad del suelo hasta 26.61 Mg ha^{-1} de los 20 cm a los 30 cm.

Así mismo, en la reserva de la Mariposa Monarca, Pérez-Ramírez, Ramírez, Jaramillo-López y Bautista (2013) señalan el contenido de COS de rodales conservados de *Abies* con un promedio 153 Mg C ha^{-1} , similar a lo obtenido en el rodal de *Abies religiosa* (BA) de este estudio ($163.09 \text{ Mg ha}^{-1}$). La asociación de *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa* (BPA) obtuvo un valor promedio de COS de 183.0 Mg ha^{-1} , el cual es un poco más elevado que el que obtuvieron Cruz-Flores y Etchevers-Barra (2011) en los suelos de las reservas de la biosfera El Cielo y Sierra de Manantlán, al norte y al occidente de México, respectivamente, con *Pinus rudis* Endl. y *Abies vejarii* Martínez (147 Mg ha^{-1}). Estas diferencias están asociadas al tipo de roca (material parental) sobre el que se desarrollan los bosques templados como lo sugieren otros estudios (Cruz-Flores y Etchevers-Barra, 2011; Galicia *et al.*, 2016).

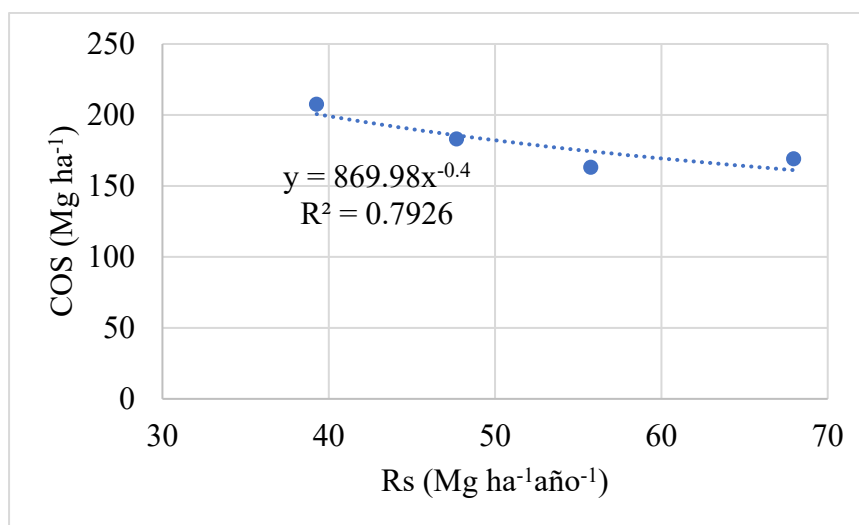


FIGURA 5. Relación entre la respiración y el carbono orgánico del suelo en los rodales del bosque templado de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), dentro del parque nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Estado de México, México.

TABLA 2. Variables ambientales y del suelo de los rodales muestreados en el bosque templado de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), dentro del parque nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Estado de México, México (valores medios y desviación estándar).

Variable	Época de Muestreo			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Ts (°C)	10.60 ± 0.60	10.80± 2.0	8.51±1.20	5.50±1.00
Hs (m ³ m ⁻³)	0.18 ± 0.04	0.43±0.1	0.33±0.08	0.23±0.05
Ta (°C)	15.50 ± 4.40	13.10±1.6	12.60±2.21	10.31±2.41
Hr (%)	51.30 ± 25.7	81.11±9.6	81.81±11.0	37.40±10.6
Vv (ms ⁻¹)	0.35 ± 0.70	0.21±0.5	0.78±1.0	0.67±1.31
R (Wm ⁻²)	275.2 ± 373.8	230.5±257.7	183.7±283.3	250.2±323.3

Ts: temperatura del suelo; Hs: humedad del suelo; Ta: temperatura ambiental; Hr: humedad relativa; Vv: velocidad del viento; R: radiación solar.

TABLA 3. Coeficientes de correlación de Pearson (*r*) entre la respiración del suelo y las variables climáticas del suelo (Zoquiapan) del bosque templado de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), dentro del parque nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Estado de México, México.

Variable	Temporada			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Ts	-0.33	-0.42	0.09	0.21
Hs	0.05	0.50	-0.26	-0.40
Ta	-0.58	0.15	0.30	-0.54
Hr	0.64	0.12	-0.36	0.59
Vv	0.36	0.31	0.27	-0.65
R	0.06	0.30	0.17	-0.63

Ts: temperatura del suelo; Hs: humedad del suelo; Ta: temperatura ambiental; Hr: humedad relativa; Vv: velocidad del viento; R: radiación solar.

Los rodales de *Abies* y *Pinus* (BA y BP) presentaron cantidades similares de COS. Esto está ligado a los estratos herbáceos presentes en cada rodal que, aunque son diferentes, son abundantes en cada rodal (Galicía *et al.*, 2016).

El rodal BPAA de la zona estudiada presenta grandes espacios abiertos, mismos que permiten que grandes cantidades de luz lleguen al sotobosque y generen capas frondosas de especies herbáceas y arbustivas (Galicía *et al.*,

2016). Además, debido a los aportes de carbono de la hojarasca de *Alnus firmifolia*—especie que se caracteriza por acumular grandes cantidades de materia orgánica en el suelo debido a que llegan a tirar sus hojas en forma total o parcial durante la época de secas (Stearn, 1956)—, este rodal reflejó los valores más elevados de COS.

Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las profundidades analizadas en esta investigación, mismas que se han observado en otros estudios (González-



Molina *et al.*, 2008; Solís Hernández *et al.*, 2014). Las variaciones de COS en las diferentes profundidades se atribuyen a la menor cantidad de raíces y entrada de restos vegetales conforme aumenta la profundidad, ya que la mayor actividad de desarrollo de las raíces de hierbas, arbustos y muchas de las raíces finas de los árboles se realiza en los primeros centímetros del suelo (Solís Hernández *et al.*, 2014). Esto coincide con lo encontrado en el bosque de Zoquiapan donde la cantidad de raíces presentes en los primeros 30 cm del suelo disminuyó conforme su profundidad aumentó; en intervalos de 0.77 g a 1.30 g, de 0.27 g a 0.61 g y de 0.21 g a 0.44 g para las capas de 0-10, 10-20 y 20-30 del suelo, respectivamente. Los suelos de Zoquiapan son catalogados como suelos profundos a muy profundos con una profundidad máxima de 120 cm, donde la primera capa tiene una profundidad de 7.6 cm (Matías Ramos *et al.*, 2020).

Aunado a esto, diferentes autores concuerdan en que el COS presenta una correlación negativa con densidad aparente; es decir, a medida que se incrementa el COS, la DAP disminuye, tendencia que se encontró en este estudio (Fig. 3). Esto concuerda con Hoover (2011) en una investigación en ecosistemas similares. Matías Ramos *et al.* (2020), mencionan que en Zoquiapan la DAP es considerada como baja, dando como resultados suelos porosos y con buen drenaje.

El COS es una propiedad dinámica que varía en función del clima, del uso y tipo de suelo, de la mineralogía, etc. (Paz *et al.*, 2016). Matías Ramos *et al.* (2020) mencionan que la degradación de ecosistemas forestales tiene una correlación negativa con la cantidad de materia orgánica presente en los suelos forestales de Zoquiapan y una correlación positiva con la pendiente del suelo. Esto muestra la importancia que tiene la pendiente en la erosión del suelo, lo que se refleja finalmente en una pérdida de COS en laderas más pronunciadas. Sin embargo, los suelos de Zoquiapan, a pesar de presentar pendientes pronunciadas, son ricos en materia orgánica, que es fundamental para la agregación y estabilización del suelo haciéndolos más resistentes a la erosión.

Variación espacial y temporal de la respiración del suelo

Las diferencias en el tipo de vegetación conducen a una variabilidad espacial y temporal en las tasas de asimilación y transporte de carbono subterráneo, producción de hojarasca, y química y microclima del suelo (temperatura y humedad), y por lo tanto pueden afectar la variabilidad en la Rs (Moyes y Bowling, 2016). Por esta razón, las mediciones de Rs proporcionan una medida integrada de varios factores, incluida la sensibilidad a la temperatura, además de la fenología de las plantas y el carbono almacenado (Giasson *et al.*, 2013). Por su parte, la fenología de las plantas estimula la Rs a través de los aportes de materia orgánica al suelo y la respiración de las raíces. De acuerdo con Ruehr y Buchmann (2010) la respiración de las raíces aumenta con la temperatura elevada, dado que la contribución de la respiración de estas a la Rs, fue mayor durante la temporada de crecimiento que durante los periodos de inactividad; también mencionan que durante los tiempos con alta fotosíntesis se registran aumentos en las tasas de respiración de la raíz. Esto muestra que la respiración de la raíz y su sensibilidad a los cambios de temperatura dependen de la fenología de la planta y, por lo tanto, de la asimilación del dosel y la asignación de carbono bajo tierra.

Los resultados de la presente investigación muestran que la Rs es altamente variable; ya sea espacial o temporalmente. Existen diferencias significativas entre rodales y las estaciones del año ($p < 0.05$), lo que se corrobora con el ANOVA de medidas repetidas. Las mediciones diarias no revelaron diferencias significativas en los rodales para ninguna de las temporadas analizadas. Este método estadístico es uno de los más utilizados para evaluar el patrón de los sujetos a través del tiempo en función de tratamientos u otras variables de tipo biológicas o sociales (Livacic-Rojas, Vallejo y Fernández, 2006). Este tipo de análisis acentúa la validez de las conclusiones estadísticas ya que posee mayor precisión en la estimación de los parámetros del modelo de análisis y mejora la potencia de prueba (Gómez, Torres, García y Navarro, 2012).

En gran medida, la tasa de R_s espacial está influenciada por las comunidades vegetales que integran cada rodal; los resultados se asemejan a lo encontrado por Ramírez Palacio y Moreno Hurtado (2008) en ecosistemas tropicales de la cordillera Central de los Andes Colombianos. Los valores diarios de CO_2 de este estudio oscilan entre $4.83 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y $29.51 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, y la respiración anual fue $52.67 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; en el bosque tropical citado, el CO_2 diario fue de $11.56 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ a $24.32 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y $9.09 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ a $23.26 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y la respiración anual de $58.35 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $51.45 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para bosques primarios y secundarios, respectivamente. Sin embargo, Campos (2014) encontró valores de 0.54 g m^{-2} a $2.15 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ de R_s en bosques de coníferas en la vertiente oriental del volcán Cofre de Perote (México), considerablemente menores que los encontrados en este estudio, lo que se le puede atribuir al cambio de uso de suelo y/o al tipo de medición de R_s empleado (para el estudio citado se usó el Alkali).

Así mismo, el flujo de salida de carbono anual total del suelo en un bosque boreal canadiense se estimó en $8.96 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Rayment y Jarvis, 2000). En el bosque de Harvard, en Petersham, Massachusetts, E. U., se encontró que entre cinco tipos diferentes de vegetación analizados (Deciduous, Hemlock, Mixed, *Pinus resinosa* Aiton y humedales) la respiración anual del suelo varió de $4.69 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a $9.51 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Giasson *et al.*, 2013). Por otro lado, en seis tipos de bosques templados de China, los resultados obtenidos en promedio fueron $4.03 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para alerce, $5.14 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para pino, $7.81 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para madera dura, $7.85 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para roble, $7.86 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para caducifolio mixto y $8.13 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para abedul-álamo. (Yang y Wang, 2006). En Corea, Jeong *et al.* (2018) realizaron un estudio en un bosque templado caducifolio compuesto predominantemente por *Quercus serrata*, *Carpinus laxiflora* y *Capinus cordata*, estos autores estimaron que la R_s anual para 2015 y 2016 fue de aproximadamente $224.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ y $251.3 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ de CO_2 ($19.40 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $21.71 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), respectivamente. Las variaciones mencionadas anteriormente pueden estar dadas por diferencias entre

clima, cobertura vegetal y tipo de medición de R_s principalmente, de cada sitio estudiado.

Estacionalmente la R_s aumentó en primavera, cuando la temperatura del suelo era más alta y la humedad del suelo era más baja, que el verano con condiciones no limitantes del agua del suelo; para BA y BP esto concuerda con lo observado por Campos (2014) en un bosque de coníferas de Veracruz, México. La baja temperatura de invierno coincidió con bajas tasas de R_s , similar a lo observado por Barba, Lloret, Poyatos, Molowny-Horas y Curiel Yuste, (2018) en una asociación de pino y encino dentro de un bosque mediterráneo.

En lo que respecta BPA y BPAA, alcanzaron su tasa máxima de R_s durante la temporada de otoño, lo que puede asociarse a que los cambios fenológicos de la planta (floración, aparición de frutos, crecimiento foliar, madurez foliar y caída de hojas) también contribuyen a la cantidad de biomasa disponible para la descomposición y la respiración. Lo anterior coincide con lo observado por Giasson *et al.* (2013), quienes encontraron que el aumento de entradas de materia orgánica al suelo causó un aumento en las emisiones de CO_2 del suelo. Los abundantes aportes de la hojarasca en otoño pueden proporcionar más materia orgánica al suelo para alimentar la respiración heterotrófica. Sin embargo Cueva, Robles Zazueta, Garatuza Payan y Yépez (2016) mencionan que varios de los estudios en ecosistemas forestales de México abordan efectos de los cambios en el uso de suelo donde la R_s aumenta mientras el COS disminuye, efecto que se revierte en ecosistemas forestales conservados al actuar como grandes sumideros de carbono como es el caso del bosque conservado de la EFEZ.

Así mismo, Covalada *et al.* (2009), Galicia *et al.* (2016) y Costa, Landim de Souza, Lima Marrocos, Lobão y Lopes da Silva (2018) mencionan que los valores más bajos de R_s se presentan en el periodo seco y los más altos coinciden con la estación lluviosa. El mismo comportamiento se presentó en este estudio: en la temporada seca, en promedio, invierno emitió 847.2 g m^{-2} de CO_2 durante la estación, con una humedad del suelo (H_s) de 0.23 m m^{-3} y primavera 1092.9 g m^{-2} de CO_2 durante la estación y 0.18 m



m^{-3} de Hs; mientras que, en la época más húmeda, el verano emitió 1755.3 g m^{-2} de CO_2 durante la estación⁻¹ con 0.43 m^{-3} de Hs y el otoño 1572 g m^{-2} de CO_2 por estación con una Hs de 0.33 m^{-3} . La rehumectación de suelos secos está asociada a un aumento de la actividad microbiana y a la mineralización, manifestándose como un aumento en las emisiones de CO_2 edáficas, conocido como el efecto “Birch” (Barnard, Blazewicz y Firestone, 2020; Unger, Máguas, Pereira, David y Werner, 2010). Kittredge, Cannone, Funk y Chapman (2018) mencionan que durante la temporada de crecimiento (verano) la respiración de las raíces es más alta, lo que aumenta la tasa de Rs. Del mismo modo, la elevada humedad (Hs y Hr) en verano y otoño, contribuyó al aumento estacional de la actividad microbiana y a la producción de enzimas y, consecuentemente, a la Rs.

En contraste con la temporada de secas (invierno), la baja humedad y temperatura del suelo causan el estrés osmótico de la comunidad microbiana del suelo, lo que puede contribuir a la reducción de la actividad enzimática extracelular necesaria para la descomposición de la sustancia orgánica, lo que lleva a una reducción de la Rs (Costa *et al.*, 2018).

Finalmente, la variación en la Rs en esta investigación parece seguir los cambios en la disponibilidad de COS (Hicks Pries *et al.*, 2018). Se observa que los rodales con menores cantidades de COS estimulan la Rs y los rodales que almacenan las mayores cantidades de COS reducen la tasa de Rs. Estos suelos ricos en materia orgánica contienen alófono como controlador principal de la estabilización de C; este mineral interactúa con la materia húmica del suelo disminuyendo la mineralización del COS y con ello es mayor su acumulación en el suelo (Galicía *et al.*, 2016). La correlación negativa de la Rs y COS responde a que la Rs está controlada mayormente por factores ambientales propios de cada estación del año, como la humedad ligada a la precipitación y temperatura, que por las cantidades de COS (Hursh *et al.*, 2017). Sin embargo, Galicía *et al.* (2016) mencionan que una disminución del COS puede estar asociada a un incremento significativo de los flujos de CO_2 . Igualmente Wang, Yang y Zhang (2006) mencionan una correlación positiva entre dichas variables.

Efecto de los factores ambientales y del suelo sobre la Rs

La influencia de variables como temperatura del suelo (Ts), humedad de suelo (Hs), temperatura ambiental (Ta), humedad relativa (Hr), velocidad del viento (Vv) y radiación solar (R) se demostró mediante un análisis de correlación de Pearson que indicó diferentes patrones de Rs dependiendo de la estación del año en el bosque templado. Esto lo demuestran Drake *et al.* (2018), y Acosta, Darenova, Krupková y Pavelka (2018), quienes mencionan que la tasa de flujo de CO_2 del suelo fue muy variable a lo largo del tiempo y exhibió estacionalidad relacionada con la temperatura y humedad del suelo en ecosistemas similares.

Aunque no se identificó un patrón definido de correlación entre Ts y Hs con la Rs, los resultados presentan variaciones de acuerdo con la temporada del año, siendo el verano donde se muestra una mayor intervención de estas variables con la Rs. Durante las mediciones de la época más seca (invierno), a medida que la Ts aumentó, el flujo de CO_2 también mostró incrementos, por lo que se presenta una correlación positiva (0.21) con la Ts y una negativa con Hs (-0.41). Durante las épocas más húmedas (verano), la correlación tendió a ser contraria, mientras la Rs sube, la Ts baja (-0.42); por otro lado, la Rs sube, cuando la Hs lo hace (0.50). Varios estudios sugieren que la Rs más elevada ocurre durante el periodo más lluvioso, donde la humedad del suelo no es un factor limitante y presenta temperaturas del suelo elevadas, lo que desencadena una mayor actividad microbiana en el suelo (Costa *et al.*, 2018; Galicía *et al.*, 2016; Giasson *et al.*, 2013).

Las variaciones estacionales registradas en las épocas más húmedas, donde la Rs es mayor, se debe a que, al haber mayor humedad y temperaturas más elevadas en el suelo, existe una mayor actividad biológica y por lo tanto una mayor Rs (Covaleda *et al.*, 2009; Ramírez Palacio y Moreno Hurtado, 2008). Los datos de este estudio sugieren que, mientras la Ts sea más elevada (primavera y verano), la correlación Ts-Rs será mayor que en el resto de las estaciones del año, mismo caso con la Hs, la que durante el verano es mayor comparada con el resto de las estaciones, así como su correlación con Rs.

Las correlaciones con R_s más altas en primavera e invierno se dieron para T_a y H_r . Los valores muestran una correlación negativa con T_a (-0.58 y -0.54 para primavera e invierno respectivamente). Igualmente, V_v y R presentan una correlación negativa con la R_s durante el invierno, -0.65 y -0.63, respectivamente. Caso contrario para H_r donde la correlación con R_s es positiva (0.64 y 0.59 para primavera e invierno respectivamente). Se considera en este estudio que la R_s fue influenciada por un complejo conjunto de condiciones ambientales, esto debido a que las condiciones climáticas son conductores de variabilidad estacional en la R_s , como lo establecido por Acosta *et al.* (2018) para ecosistemas forestales similares.

CONCLUSIONES

En los suelos del bosque conservado de Zoquiapan, se almacena más COS en los rodales BPAA y BPA (masas mixtas) comparados con los rodales BA y BP (masas puras), debido a que los rodales de masas mixtas albergan mayor abundancia de estratos herbáceos y arbustivos a consecuencia de la entrada de gran cantidad de luz solar al sotobosque. Se presentaron diferencias significativas entre los rodales estudiados y la profundidad del suelo analizada.

La R_s es más elevada en el rodal del género *Pinus* (BP) y en el rodal del género *Abies* (BA) que en rodales con masas mixtas (BPA y BPAA). Durante la temporada de verano se emitió la mayor cantidad de CO_2 proveniente del suelo a la atmósfera asociado a las temperaturas más altas y elevado contenido de humedad en el suelo.

La R_s varía dependiendo de la temporada del año, así como de las variables ambientales y del suelo, como es el caso de la H_s que tiene mayor influencia sobre la R_s que la T_s durante el verano, al igual que la humedad relativa sobre la temperatura del aire en primavera e invierno. La temporada invernal muestra mayor influencia de las condiciones ambientales y del suelo sobre la R_s en comparación con resto de las estaciones del año.

El carbono orgánico almacenado en los suelos del bosque templado de Zoquiapan presentó una correlación negativa a las variaciones de la R_s . Los cambios en la R_s sugieren una fuerte dependencia al escenario ambiental

debido a una interacción del clima y tipo de vegetación presente en el área de estudio, ya que se encontró que el comportamiento del R_s está influenciado por variables ambientales y del suelo y el COS, dependiendo de las características propias de la época del año y del rodal analizado.

RECONOCIMIENTOS

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

- Acosta, M., Darenova, E., Krupková, L., & Pavelka, M. (2018). Seasonal and inter-annual variability of soil CO_2 efflux in a Norway spruce forest over an eight-year study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256-257(March), 93-103. doi: 10.1016/j.agrformet.2018.03.005
- Acosta Mireles, M., Carrillo Anzures, F., Delgado, D., & Velasco Bautista, E. (2014). Establecimiento de parcelas permanentes para evaluar impactos del cambio climático en el Parque Nacional Iztapopo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(26), 06-29.
- Adachi, M., Ito, A., Yonemura, S., & Takeuchi, W. (2017). Estimation of global soil respiration by accounting for land-use changes derived from remote sensing data. *Journal of Environmental Management*, 200(September), 97-104. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.05.076
- Anderson-Teixeira, K. J., Wang, M. M. H., McGarvey, J. C., Herrmann, V., Tepley, A. J., Bond-Lamberty, B., & LeBauer, D. S. (2018). ForC: a global database of forest carbon stocks and fluxes. *Ecology, Ecological Society of America*, 99(6), 1507. doi: 10.1002/ecy.2229
- Barba, J., Lloret, F., Poyatos, R., Molowny-Horas, R., & Curiel Yuste, J. (2018). Multi-temporal influence of vegetation on soil respiration in a drought-affected forest. *IForest-Biogeosciences and Forestry*, 11(2), 189-198. doi: 10.3832/for2448-011
- Barnard, R. L., Blazewicz, S. J., & Firestone, M. K. (2020). Rewetting of soil: revisiting the origin of soil CO_2 emissions. *Soil Biology and Biochemistry*, 147, 107819. doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107819
- Brændholt, A., Steenberg Larsen, K., Ibrom, A., & Pilegaard, K. (2017). Overestimation of closed-chamber soil CO_2 effluxes at low atmospheric turbulence. *Biogeosciences*, 14(6), 1603-1616. doi: 10.5194/bg-14-1603-2017



- Campos C., A. (2014). Trends in soil respiration on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (Mexico): Environmental contributions. *CATENA*, 114, 59-66. doi: 10.1016/j.catena.2013.10.010
- Chávez-Salcedo, L. F., Queijeiro-Bolaños, M. E., López-Gómez, V., Cano-Santana, Z., Mejía-Recamier, B. E., & Mojica-Guzmán, A. (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: 10.1007/s11676-017-0544-y
- Chen, Z., Xu, Y., Fan, J., Yu, H., & Ding, W. (2017). Soil autotrophic and heterotrophic respiration in response to different N fertilization and environmental conditions from a cropland in Northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, 110, 103-115. doi: 10.1016/j.soilbio.2017.03.011
- Costa, E. N. D. da, Landim de Souza, M. F., Lima Marrocos, P. C., Lobão, D., & Lopes da Silva, D. M. (2018). Soil organic matter and CO₂ fluxes in small tropical watersheds under forest and cacao agroforestry. *PLOS ONE*, 13(7), 1-22. doi: 10.1371/journal.pone.0200550
- Covalada, S., Prat, C., García-Oliva, F., Etchevers, J. D., Gallardo, J. F., & Paz, F. (2009). *Flujos de CO₂ edáfico en un transecto de bosques de pino-encino afectados por actividad antropica en la microcuenca de Atecuaro (Michoacan, Mexico)*. En J. F. Gallardo Lancho (coord.) & J. Campos Alves, M. E. Conti (Eds.), *Emisiones de gases con efecto invernadero en ecosistemas iberoamericanos* (310 pp.). Salamanca, España: Red Iberoamericana de Física y Química Ambiental-Sociedad Iberoamericana de física y química ambiental. Salamanque: SIFYQA.
- Cruz-Flores, G., & Etchevers-Barra, J. D. (2011). Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Agrociencia*, 45(8), 849-862.
- Cueva, A., Robles Zazueta, C. A., Garatuza Payan, J., & Yépez, E. A. (2016). Soil respiration in Mexico: Advances and future directions. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 253-269. Recuperado de <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/148/127>
- Drake, J. E., Macdonald, C. A., Tjoelker, M. G., Reich, P. B., Singh, B. K., Anderson, I. C., & Ellsworth, D. S. (2018). Three years of soil respiration in a mature eucalypt woodland exposed to atmospheric CO₂ enrichment. *Biogeochemistry*, 139(1), 85-101. doi: 10.1007/s10533-018-0457-7
- Etchevers, J. D., Monreal, C. M., Hidalgo, C., Acosta, M., Padilla, J., & López, R. M. (2005). *Manual para determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas*. Montecillo, Mexico: Colegio de Postgraduados.
- Galicia, L., Gamboa Cáceres, A. M., Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña Ramírez, V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1-29. Recuperado de <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/73>
- Giasson, M.-A., Ellison, A. M., Bowden, R. D., Crill, P. M., Davidson, E. A., Drake, J. E., Frey, S. D., Hadley, J. L., Lavine, J. M., Melillo, J. M., Munger, J. W., Nadelhoffer, K. J., Nicoll, L., Ollinger, S. V., Savage, K. E., Steudler, P. A., Tang, J., Varner, R. K., Wofsy, S. C., Foster, D. R., & Finzi, A. C. (2013). Soil respiration in a northeastern US temperate forest: a 22-year synthesis. *Ecosphere*, 4(11), 140. doi: 10.1890/ES13.00183.1
- Gómez, S., Torres, V., García, Y. K., & Navarro Alberto, J. A. (2012). Procedimientos estadísticos más utilizados en el análisis de medidas repetidas en el tiempo en el sector agropecuario. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 46(1), 1-7. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/266000027>
- González-Molina, L., Etchevers-Barra, J. D., & Hidalgo-Moreno, C. (2008). Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*, 42(7), 741-751.
- Hanson, P. J., Edwards, N. T., Garten, C. T., & Andrews, J. A. (2000). Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 48(1), 115-146. doi: 10.1023/A:1006244819642
- Hicks Pries, C. E., Castanha, C., Porras, R., Phillips, C., & Torn, M. S. (2018). Response to Comment on "The whole-soil carbon flux in response to warming". *Science* 359(6378), eaao0457. doi: 10.1126/science.aao0457
- Hoover, C. M. (2011). Management Impacts on Forest Floor and Soil Organic Carbon in Northern Temperate Forests of the US. *Carbon Balance and Management*, 6(1), 17. doi: 10.1186/1750-0680-6-17
- Hursh, A., Ballantyne, A., Cooper, L., Maneta, M., Kimball, J., & Watts, J. (2017). The sensitivity of soil respiration to soil temperature, moisture, and carbon supply at the global scale. *Global Change Biology*, 23(5), 2090-2103. doi: 10.1111/gcb.13489
- Jeong, S.-H., Eom, J.-Y., Park, J.-Y., Chun, J.-H., & Lee, J.-S. (2018). Effect of precipitation on soil respiration in a temperate broad-leaved forest. *Journal of Ecology and Environment*, 42(1), 10. doi: 10.1186/s41610-018-0071-6
- Kittredge, H. A., Cannone, T., Funk, J., & Chapman, S. K. (2018). Soil respiration and extracellular enzyme production respond differently across seasons to elevated temperatures. *Plant and Soil*, 425(1), 351-361. doi: 10.1007/s11104-018-3591-z

- Liu, T., Peng, D., Tan, Z., Guo, J., & Zhang, Y. (2021). Effects of stand density on soil respiration and labile organic carbon in different aged *Larix principis-rupprechtii* plantations. *Ecological Processes*, 10, 44. doi: 10.1186/s13717-021-00301-9
- Liu, Z., Shi, Z., Wei, H., & Zhang, J. (2022). Acid rain reduces soil CO₂ emission and promotes soil organic carbon accumulation in association with decreasing the biomass and biological activity of ecosystems: A meta-analysis. *Catena*, 208, 105714. doi: 10.1016/j.catena.2021.105714
- Livacic-Rojas, P., Vallejo, G., & Fernández, P. (2006). Procedimientos estadísticos alternativos para evaluar la robustez mediante diseños de medidas repetidas. *Revista Latinoamericana de Psicología*, 38(3), 579-598.
- Lomas-Barrié, C. T., Terrazas-Domínguez, S., & Tchikoué-Maga, H. (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.
- López-Teloxa, L., & Monterroso-Rivas, A. (2020). Estrategias de mitigación de CO₂ a partir de la respiración del suelo. *Revista de Ciencias de La Vida*, 32(2), 30-41.
- López-Teloxa, L., Monterroso-Rivas, A. I., & Gómez-Díaz, J. D. (2020). Diseño de calibración para cuantificar emisiones de CO₂ (respiración del suelo) durante intervalos diurnos. *Agrociencia*, 54(6), 731-745. doi: 10.47163/agrociencia.v54i6.2188
- Matías Ramos, M., Gómez Díaz, J. D., Monterroso Rivas, A. I., Uribe Gómez, M., Villar Hernández, B. de J., Ruiz García, P., & Asencio, C. (2020). Factores que influyen en la erosión hídrica del suelo en un bosque templado. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(59), 51-71.
- Melillo, J. M., Frey, S. D., DeAngelis, K. M., Werner, W. J., Bernard, M. J., Bowles, F. P., Gold, P., Knorr, M. A., & Grandy, A. S. (2017). Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world. *Science* 358, 6359. doi: 10.1126/science.aan2874
- Mendiola Patiño, G., & de Buen Richkarday, B. H. (2018) (Coords.). *México, Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (Inecce). Recuperado de <http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/117>
- Moyes, A. B., & Bowling, D. R. (2016). Plant community composition and phenological stage drive soil carbon cycling along a tree-meadow ecotone. *Plant and Soil*, 401(1), 231-242. doi: 10.1007/s11104-015-2750-8
- Paredes-Gonzalez, A., Monterroso-Rivas, A. I., Rodríguez-Esparza, L. J., & Zamudio-Sánchez, F. J. (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: 10.5154/r.rchscfa.2017.07.041
- Paz Pellat, F., Argumedo Espinoza, J., Cruz Gaistardo, C. O., Etchevers, J. D., & de Jong, B. (2016). Distribución espacial y temporal del carbono orgánico del suelo en los ecosistemas terrestres de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 289-310.
- Pérez-Ramírez, S., Ramírez, M. I., Jaramillo-López, P. F., & Bautista, F. (2013). Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(1), 185-173. doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.06.042
- Propa, M. J., Hossain, M. I., & Ahmed, A. (2021). Carbon Stock and Respiration of Rhizosphere Soils of Sal (*Shorea Robusta* Roxb. Ex. Gaertn. F.) In Relation To Some Environmental Variables of Different Sal Forest Stands of Bangladesh. *Bangladesh Journal of Botany*, 50(3), 685-693. doi: 10.3329/bjb.v50i3.55849
- Ramírez Palacio, A. A., & Moreno Hurtado, F. H. (2008). Respiración microbiana y de raíces en suelos de bosques tropicales primarios y secundarios (Porce, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Sede Medellín*, 61(1), 4381-4393. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24738/25299>
- Rayment, M. B., & Jarvis, P. G. (2000). Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(1), 35-45. doi: 10.1016/S0038-0717(99)00110-8
- Ruehr, N. K., & Buchmann, N. (2010). Soil respiration fluxes in a temperate mixed forest: seasonality and temperature sensitivities differ among microbial and root-rhizosphere respiration. *Tree Physiology*, 30(2), 165-176. doi: 10.1093/treephys/tpp106
- Schlesinger, W. H. (1995). Soil respiration and changes in soil carbon stocks. En F. T. Mackenzie (Ed.), *Biotic Feedbacks in the Global Climate System: Will the Warming Feed the Warming?* (pp. 159-168). New York: Oxford University Press.
- Solís Hernández, A., Nájera Luna, J. A., Méndez González, J., Vargas Larreta, B., & Álvarez Gallegos, M. (2014). Carbono orgánico del suelo en rodales silvícolas del ejido La Victoria, Pueblo Nuevo, Durango. *Investigación y Ciencia*, 22(63), 5-11.
- Stearn, W. T. (1956). Further information about Kunth's "Nova Genera et Species Plantarum" and "Mimosas." *Taxon*, 5(7), 153-156. doi: 10.2307/1216647
- Unger, S., Máguas, C., Pereira, J. S., David, T. S., & Werner, C. (2010). The influence of precipitation pulses on soil respiration –



Assessing the “Birch effect” by stable carbon isotopes. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(10), 1800-1810. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.06.019

Wang, C., Yang, J., & Zhang, Q. (2006). Soil respiration in six temperate forests in China. *Global Change Biology*, 12(11), 2103-2114. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01234.x

Xu, M., & Shang, H. (2016). Contribution of soil respiration to the global carbon equation. *Journal of Plant Physiology*, 203, 16-28. doi: 10.1016/j.jplph.2016.08.007

Yáñez Sandoval, A. (2004). La captura de carbono en bosques: ¿una herramienta para la gestión ambiental? *Gaceta Ecológica*, 70, 5–18.

Yáñez Sandoval, A., & Vargas Mena, A. (2004). La captura de carbono en bosques: ¿una herramienta para la gestión ambiental? *Gaceta Ecológica*, 70, 5–18.

Yang, J., & Wang, C. (2006). Partitioning soil respiration of temperate forest ecosystems in northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 26(6), 1640-1646. doi: 10.1016/S1872-2032(06)60027-9

Manuscrito recibido el 23 de abril de 2020

Aceptado el 16 de julio de 2020

Publicado el 22 de diciembre de 2021

Este documento se debe citar como:

Cruz-Sánchez, Y., López-Teloxa, L. C., Gómez-Díaz, J. D., & Monterroso-Rivas, A. I. (2021). Respiración del suelo en un bosque templado de México y su relación con el carbono orgánico. *Madera y Bosques*, 27(2), e2722153. doi: 10.21829/myb.2021.2722153



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.