



Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

EFFECTOS DEL MANEJO FORESTAL EN LA EMISIÓN DE CO₂ DE UN SUELO UMBRISOL EN BOSQUES DE DURANGO, MÉXICO

EFFECTS OF FOREST MANAGEMENT ON THE SOIL CO₂ EMISSION OF AN UMBRISOL IN FORESTS OF DURANGO, MEXICO

Luna Robles, Erik Orlando; Israel Cantú Silva; Francisco Javier Hernández y Silvia Janeth Bejar Pulido

EFFECTOS DEL MANEJO FORESTAL EN LA EMISIÓN DE CO₂ DE UN SUELO UMBRISOL EN BOSQUES DE DURANGO, MÉXICO

EFFECTS OF FOREST MANAGEMENT ON THE SOIL CO₂ EMISSION OF AN UMBRISOL IN FORESTS OF DURANGO, MEXICO

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 56: 101-114 México. Julio 2023

DOI: 10.18387/polibotanica.56.6



Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0
Atribución-No Comercial ([CC BY-NC 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)).

Efectos del manejo forestal en la emisión de CO₂ de un suelo umbrisol en bosques de Durango, México

Effects of forest management on the soil CO₂ emission of an umbrisol in forests of Durango, Mexico

Erik Orlando Luna Robles;
Israel Cantú Silva;
Francisco Javier Hernández y
Silvia Janeth Bejar Pulido

EFFECTOS DEL MANEJO
FORESTAL EN LA EMISIÓN
DE CO₂ DE UN SUELO
UMBRISOL EN BOSQUES
DE DURANGO, MÉXICO

EFFECTS OF FOREST
MANAGEMENT ON THE
SOIL CO₂ EMISSION OF AN
UMBRISOL IN FORESTS OF
DURANGO, MEXICO

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 56: 00-00. Julio 2023

DOI:

10.18387/polibotanica.56.6

Erik Orlando Luna Robles / eranroka@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5133-0403>
TECNM / Instituto Tecnológico de El Salto

Israel Cantú Silva / icantu59@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8996-0881>

Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León

Francisco Javier Hernández / fcojhernan@yahoo.com.mx
<https://orcid.org/0000-0003-0480-624X>

Silvia Janeth Bejar Pulido / siljan2411@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5163-704X>

TECNM / Instituto Tecnológico de El Salto

RESUMEN: En los suelos forestales se llevan a cabo diferentes procesos biogeoquímicos, los cuales han sido modificados por acciones antrópicas, por lo que las actividades ligadas al manejo forestal no son la excepción. El objetivo fue determinar el efecto de tres cortas de regeneración Árboles Padre, Matarrasa y Selección sobre la respiración del suelo en un Umbrisol, comparándolos con un área regenerada Post incendio y un rodal de Referencia, en bosques templados de Durango, México. La respiración del suelo se determinó con mediciones realizadas de las 12:30 a 15:00 h durante el periodo de diciembre de 2019 a octubre de 2020 empleando el sistema portátil EGM-4 (U.K.). La tasa de respiración del suelo osciló entre 0 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (21 de diciembre de 2019, rodal de Matarrasa) y 36.45 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (27 de julio, rodal Árboles Padre). Todos los rodales presentaron tasas promedio bajas de respiración del suelo, respecto al rodal de Referencia (8.86 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Los flujos de CO₂ fueron mayores al inicio de la temporada de lluvias. Los resultados demostraron que las prácticas silvícolas empleadas en la región de estudio son una buena estrategia para reducir las emisiones de CO₂ a la atmosfera.

Palabras clave: suelos forestales, procesos biogeoquímicos, cortas de regeneración, respiración del suelo, cambio climático.

ABSTRACT: Different biogeochemical processes are carried out in forest soils, which have been modified by anthropic actions, so that activities related to forest management are not the exception. Therefore, the objective was to determine the effect of three regeneration cuts (Seed trees, Clear cutting and Selection) on the soil respiration in an Umbrisol, comparing them with a Post-fire regenerated area and a Reference stand in temperate forests of Durango, Mexico. Soil respiration was determined with measurements made in the afternoon (12:30 to 15:00 h) during the period from December 2019 to October 2020 using the portable EGM-4 system (U.K.). The soil respiration rate ranged between 0 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (December 21, 2019, Clear cutting stand) and 36.45 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (July 27, Seed trees stand). Specifically, all the stands presented average low rates of soil respiration with respect to the reference stand (8.86 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). CO₂ fluxes were higher at the beginning of the rainy season. The results showed that the silvicultural practices used in the study region are a good strategy to reduce CO₂ emissions into the atmosphere and thus mitigate the processes related to climate change.

Key words: forest soils, biogeochemical processes, regeneration cuts, soil respiration, climate change.

INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los gases de efecto invernadero (GEI) impulsores del cambio climático, sus emisiones hacia la atmósfera son tanto de origen natural como antrópico (Zárate Malpica & Miranda Zambrano, 2016). En este sentido, el cambio de uso del suelo y la silvicultura representaron el 6.3% (46.9 millones de toneladas de CO₂) de las emisiones totales en el periodo de 1990 a 2010, donde el consumo de combustibles fósiles fue la principal fuente de emisiones (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2013). Los bosques cubren aproximadamente el 30% de la superficie terrestre y son considerados como el principal reservorio de carbono con 681 ± 66 Pg, de esa cantidad alrededor del 44% se encuentra en el suelo (383 ± 28 Pg C), por tal razón estos juegan un papel significativo en la mitigación del cambio climático (Brown & Markewitz, 2018).

En el interior del suelo existen dos procesos biológicos responsables del flujo de CO₂: la respiración autótrofa emitida por la actividad metabólica de las raíces y la producción de dióxido de carbono generada por la respiración heterótrofa, cuando los organismos realizan la descomposición de material orgánico (Vargas *et al.*, 2010b). Esta variable ecopedológica es considerada como un indicador de las tasas de descomposición y liberación de los nutrientes las cuales están sujetas por la calidad de la materia y otras variables del suelo (humedad y temperatura del suelo) (Guerrero *et al.*, 2012), por lo que su evaluación es de importancia para definir criterios del manejo sustentables del suelo y vegetación (Vargas *et al.*, 2010a; Millan-Romero *et al.*, 2018; Yan *et al.*, 2019).

De acuerdo a Cruz-Sánchez *et al.* (2022) los balances en las emisiones de gases como el dióxido de carbono en bosques son importantes por su extensión a nivel global, donde la mayor producción de CO₂ se origina por la respiración del suelo (Oertel *et al.*, 2016). Particularmente se estima que la respiración del suelo libera entre 50 y 75 Pg C año⁻¹, y según Cueva *et al.* (2012) es considerada como la segunda mayor fuente de intercambio de CO₂ terrestre a la atmósfera, solo después de la fotosíntesis. Sin embargo, a nivel global el suelo se encuentra sometido a diferentes presiones tales como urbanización, actividades agrícolas, silvicultura e incendios forestales que afectan su funcionalidad, desencadenando reacciones inmediatas sobre procesos relacionados con el cambio climático (Sahagún & Reyes, 2018). El manejo forestal puede alterar directa o indirectamente en las emisiones de CO₂ del suelo, convirtiéndolos en fuentes o sumideros dependiendo del bosque, su composición, edad y las prácticas silvícolas que se implementen (Jandl *et al.*, 2007).

Específicamente en el estado de Durango el manejo forestal contempla dos cortas de regeneración para la cosecha de las masas forestales, las cuales son cortas de selección (individual o grupal) y árboles padre correspondientes al Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) y Método de Desarrollo Silvícola (MDS), respectivamente (López Hernández *et al.*, 2017). Sin embargo, durante la última década se han implementado cortas de regeneración de corta total o Matarrasa, aunque en menor extensión de terreno por la orografía de la región. La ejecución de estas prácticas silvícolas implica variada intensidad de mecanización y sistema de aprovechamiento (Monárrez-González *et al.*, 2018), las influyen en la respiración del suelo, a través de la extracción de biomasa y la apertura de la cubierta forestal, lo que modifica las características micro climáticas del suelo (Lull *et al.*, 2020). Asimismo, la eliminación parcial del arbolado influye en la densidad de raíces, comunidades microbianas, incorporación de materia orgánica y los ciclos de nutrientes, además las cortas resultarán en la muerte de los sistemas de raíces de los árboles cosechados, lo que debería reducir la contribución de la respiración de las raíces al CO₂ liberada de los suelos (Olajuyigbe *et al.*, 2012).

A nivel mundial los primeros antecedentes en la literatura relacionados sobre respiración del suelo datan de inicios del siglo XX principalmente en regiones europeas y norte americanas (Bond-Lamberty & Thomson, 2010), en cuanto a México a pesar de su marcada diversidad de ecosistemas se han realizado evaluaciones en regiones desérticas, boscosas y tropicales mayoritariamente a partir del siglo XXI dominando aquellos realizados en sistemas agrícolas y forestales tropicales sobre los realizados en bosques templados (Cueva *et al.*, 2012). Es importante resaltar que varios de los estudios en áreas forestales de México abordan los efectos de los cambios de uso de suelo donde los flujos de CO₂ aumentan significativamente derivado de las diferentes prácticas que se implementan para maximizar la producción agrícolas o pecuarias (Cueva *et al.*, 2016; Yáñez Díaz *et al.*, 2017). En bosques templados ha sido reportado por Cruz-Sánchez *et al.* (2022) que la respiración del suelo está influenciada por la cobertura vegetal, la temperatura y humedad del suelo, y las condiciones climáticas dependiendo de la temporada del año. Aunado a lo anterior, cabe señalar que la respiración media anual del suelo es hasta en un 72% superior en bosques característicos de latifoliadas que en los bosques de coníferas. Diversos estudios han demostrado que las prácticas silvícolas implementadas alteran el entorno del suelo, pero la mayoría de los estudios se centran en evaluar los impactos sobre las reservas de carbono y otras propiedades físicas y químicas mientras que la información sobre la respuesta fisiológica de los procesos del suelo, como la respiración es limitada (Luna-Robles *et al.*, 2021; Cantú Silva & Luna Robles, 2022). No obstante, entre los estudios que reportan los efectos de los tratamientos silvícolas sobre la respiración del suelo destacan que los cambios en las tasas de entrada y descomposición de la materia orgánica, derivado de la apertura del dosel, cambios en la humedad y temperatura del suelo son los principales factores que alteran el flujo de CO₂ del suelo a la atmósfera (James & Harrison, 2016; Darenova & Čater, 2018).

Con la finalidad de entender si las prácticas forestales conducen a reducir o aumentar los flujos de dióxido de carbono emitidos por la respiración del suelo tipo Umbrisol, los propósitos de este trabajo fueron: a) comparar la respuesta de la respiración del suelo en rodales con regeneración natural establecida a través de las cortas de regeneración de Árboles padre, Selección y Matarrasa contra un área regenerada Post incendio y un rodal control denominado de Referencia y b) analizar la relación de las variables temperatura y humedad del suelo con la respiración en bosques templados fríos de Durango, México.

MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el ejido de La Ciudad (2583 msnm), en la Sierra Madre Occidental, en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango. El clima característico es semifrío subhúmedo con lluvias en verano con una temperatura media anual que oscila de 5 °C a 12 °C, la precipitación media anual es de 1200 mm, siendo el intervalo de julio a septiembre como el período más húmedo (García, 1973). El tipo de suelo dominante es el Umbrisol, el cual se caracteriza por tener un alto contenido de materia orgánica dentro del primer metro de profundidad y niveles de pH muy ácidos (<5.5) con baja saturación de bases (WRB, 2022), solo ocupan el 1% de la superficie continental de México, el 2.91% de la superficie del estado de Durango y específicamente el 3.3% del Municipio de Pueblo Nuevo, concentrándose principalmente en los bosques del ejido La Ciudad, (Fig. 1) (INEGI, 2005). La vegetación está compuesta principalmente por *Pinus durangensis* Martínez, *P. cooperi* C. E. Blanco, *P. ayacahuite* Ehren, *Juniperus deppeana* Steud. y *Quercus sideroxyla* Bonpl. (González-Elizondo *et al.*, 2022).

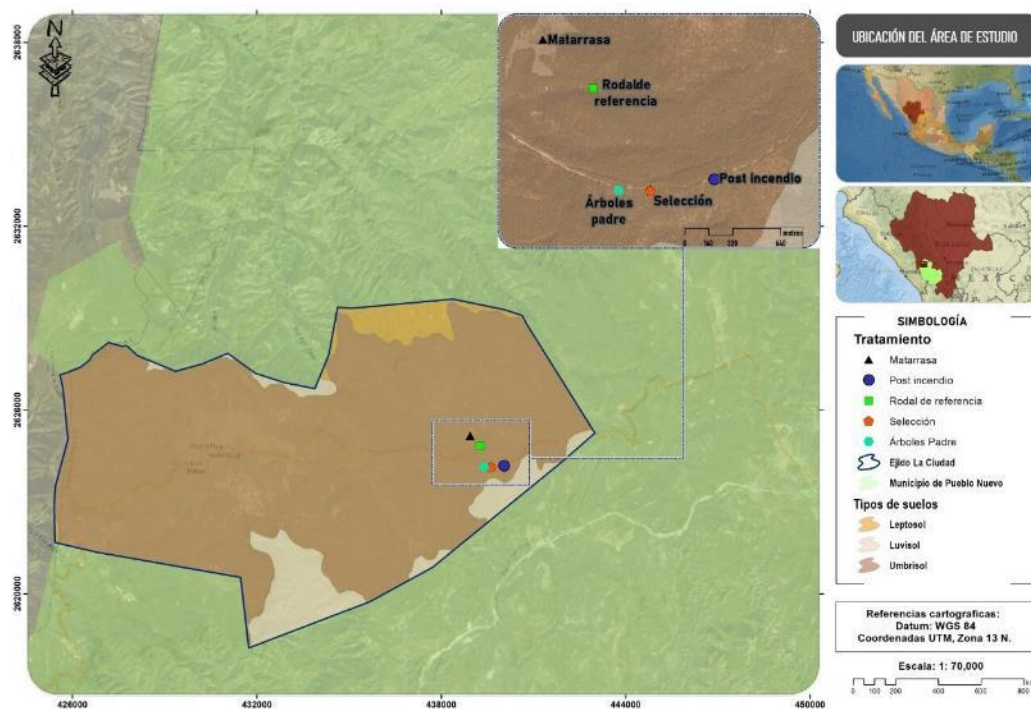


Fig. 1. Ubicación del área de estudio.

La evaluación se llevó a cabo en cinco rodales silvícolas con diferentes condiciones de manejo y perturbación, los cuales se describen a continuación: a) Matarrasa (intensidad de corta: 100%): consistió en la extracción total de la masa forestal en un área de 10.29 ha; b) Árboles Padre (intensidad de corta: 80%): aplicada en un área de 9 ha con un volumen inicial y posterior de 206.8 y 41.3 m³ ha⁻¹; c) Selección (intensidad de corta: 34%); superficie aplicada de 20 ha, con un volumen inicial y posterior de 223.8 y 147.4 m³ ha⁻¹, y d) Área regenerada Post incendio de 10 ha; y e): Rodal de Referencia o testigo de 4.35 ha con una masa arbórea próxima a aplicarse corta de regeneración. Algunas características de los rodales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores promedio de las características de la vegetación y del suelo de los diferentes rodales silvícolas.

Características	Vegetación				Suelo				
	Rodal	Densidad Individuos ha ⁻¹	DN (>7 cm)	Altura (m)	DA (g cm ⁻³)	Ho (Mg ha ⁻¹)	Humus (Mg ha ⁻¹)	pH	MOS (%)
Matarrasa		160	7.7	3.2	0.5	0.3	0.7	4.2	10.7
Árboles Padre		80	38.1	18.2	0.7	0.9	2.3	4.4	9.6
Selección		250	26.8	15.4	0.8	2.1	2.4	4.0	8.8
Post incendio		6400	8.1	7.4	0.6	0.9	2.5	4.7	9.6
Referencia		660	21.2	16.2	0.6	1.6	2.3	4.3	8.1

DN= Diámetro normal, DA= Densidad aparente, Ho= hojarasca, MOS: Materia orgánica del suelo Fuente: Luna-Robles *et al.* (2021); Cantú Silva & Luna Robles (2022).

Muestreo

La respiración del suelo se determinó en cada uno de los rodales durante el periodo del 21 de diciembre de 2020 al 10 de octubre de 2021 con mediciones en la tarde (12:30 a 15:00 h) semanalmente, considerando este horario como el de mayor actividad de flujo de CO₂ (Yáñez Díaz *et al.*, 2017). Las lecturas se tomaron en cada rodal silvícola, con cuatro repeticiones distribuidas aleatoriamente en el área de muestreo con una distancia mínima entre ellas de 10 m, con un total de 20 mediciones por fecha de muestreo.

La respiración se estimó a partir de la metodología descrita por Cantú *et al.* (2010), la cual consiste en utilizar el sistema portátil EGM-4 (PP-Systems, U.K.). Este equipo cuenta con un analizador de gases por infrarrojos (IRGA) y una cámara dinámica cerrada (SCR-1) que calcula y registra la tasa de respiración del suelo (flujo de CO₂). Su uso es muy práctico e implica la colocación directa de la cámara sobre el suelo por aproximadamente 120 s, registrando las concentraciones de CO₂ en micromoles de dióxido de carbono por metro cuadrado por segundo ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). La temperatura del suelo se midió en conjunto con la respiración, mediante un sensor (STP-1) instalado en el EGM-4 (Fig. 2).



Fig. 2. Estimación del flujo de CO₂ mediante el sistema portátil EGM-4

Análisis estadísticos

Los datos de las variables de humedad (%), temperatura (°C) y respiración del suelo ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) fueron sometidos a pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov. Cuando los datos no cumplieron el supuesto de normalidad, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para determinar si existen diferencias estadísticas entre los rodales evaluados ($P \leq 0.05$). Asimismo, se evaluó el grado de correlación entre las propiedades del suelo mediante el coeficiente de correlación de Spearman. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el paquete estadístico Statistical Package for the Social Sciences, versión 22.

RESULTADOS

De acuerdo a las pruebas de normalidad de Kolmogórov-Smirnov ninguna de las variables cumplió con este supuesto a pesar de realizar las transformaciones disponibles ($P \geq 0.05$), por lo cual se emplearon pruebas no paramétricas para detectar diferencias significativas entre rodales silvícolas (Kruskal Wallis, $P < 0.05$). En este sentido solo temperatura y respiración del suelo presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre los diferentes rodales silvícolas en contraste con la humedad del suelo que no presentó diferencias (Tabla 2).

Tabla 2. Estadísticos de las pruebas de normalidad de Kolmogórov-Smirnov y prueba de Kruskal Wallis para las variables del suelo

Estadísticos de pruebas	Temperatura	Respiración	Humedad
Kolmogórov-Smirnov			
N	560	560	560
Estadístico de K-S	0.088	0.171	0.088
Valor de P	0.001 ^{NS}	0.001 ^{NS}	0.001 ^{NS}
Kruskal Wallis			
Chi-cuadrado	30.678	11.311	6.996
gl	4	4	4
Valor de P	0.001*	0.023*	0.136

NS: No Significativo, * Valores con asterisco (Kruskal-Wallis) representan diferencias estadísticas significativas

Los flujos medios de CO₂ van de un mínimo de 6.31 hasta un máximo de 8.86 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, particularmente se observó una disminución de la respiración del suelo en todos los rodales respecto al rodal de Referencia, presentando el siguiente orden descendente Referencia > Árboles Padre > Selección > Matarrasa < Post incendio. Los valores más altos y bajos de temperatura del suelo se presentaron en Referencia y Post incendio, por último, la humedad del suelo promedio fue de 44% (Tabla 3).

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las variables del suelo en los diferentes rodales silvícolas (n=28).

Estadísticos descriptivos	Árboles Padre	Post incendio	Matarrasa	Referencia	Selección
Flujos de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)					
Media	8.42*	6.31*	6.98*	8.86*	7.17*
Mediana	4.49	4.39	4.39	6.86	4.57
Desviación estándar	8.57	4.26	5.90	6.53	6.30
Máximo	36.45	13.97	19.52	26.51	24.57
Mínimo	1.10	0	0.65	2.24	1.15
Temperatura (°C)					
Media	20.14*	16.37*	21.41*	17.53*	19.57*
Mediana	20.38	17.71	21.00	18.50	19.38
Desviación estándar	6.54	5.83	6.25	6.03	7.02
Máximo	34.00	27.25	34.50	26.00	31.33
Mínimo	4.50	0	5.25	6.00	3.25
Humedad (%)					
Media	46.50 ^{NP}	43.99 ^{NP}	39.65 ^{NP}	42.83 ^{NP}	45.16 ^{NP}
Mediana	51.86	43.31	37.54	43.57	48.94
Desviación estándar	23.11	20.18	19.51	18.15	20.78
Máximo	78.37	90.06	87.64	78.52	86.94
Mínimo	9.21	0	8.25	12.12	14.20

* Valores con asterisco (Kruskal-Wallis) representan diferencias estadísticas significativas entre los rodales ($P \leq 0.05$), NP: representan nulas diferencias estadísticas significativas entre los rodales ($P \geq 0.05$).

Respiración del suelo

La tasa de respiración del suelo osciló entre $0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (21 de diciembre de 2019, rodal de Matarrasa) y $36.45 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (27 de julio, rodal Árboles Padre). En la figura 3 se aprecia que la respiración del suelo se mantuvo baja durante el periodo de diciembre de 2019 a mayo de 2020, incrementándose durante el periodo de julio a agosto, el cual coincide con la temporada de lluvias de la región. Pasado el periodo de lluvias la respiración del suelo tiende a disminuir a los niveles registrados durante el invierno y primavera. Particularmente, se presentaron diferencias en 13 de los 28 muestreos durante el periodo evaluado entre los rodales silvícolas.

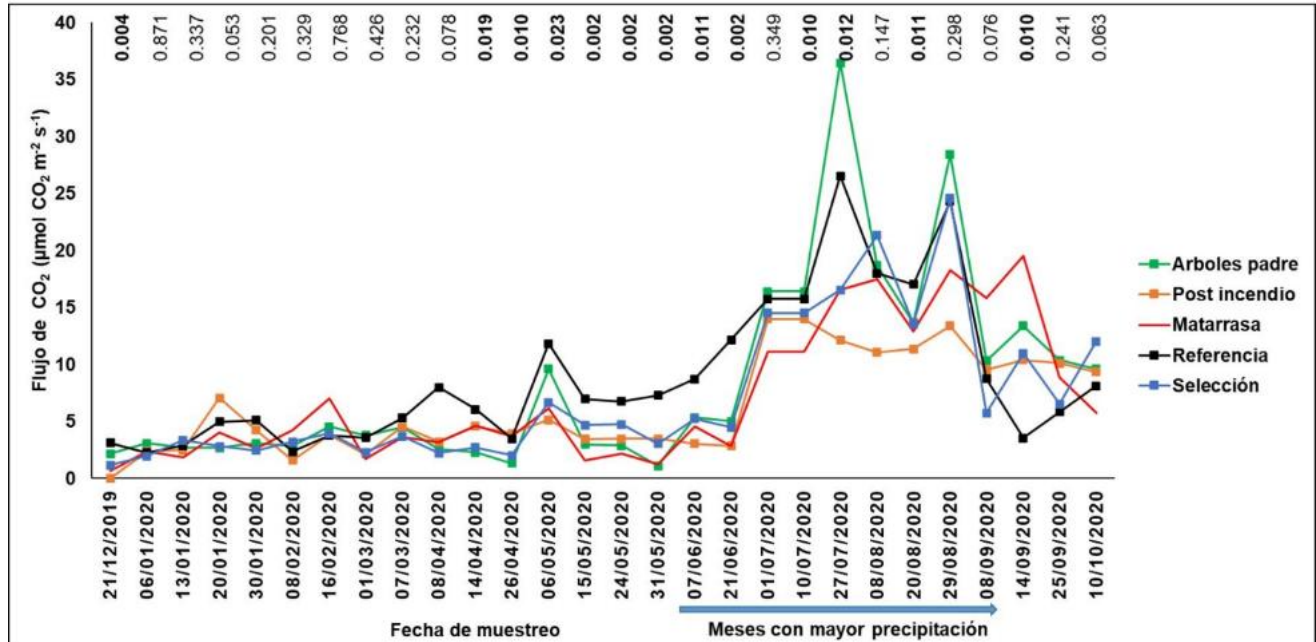


Fig. 2. Variación estacional de la respiración del suelo para los distintos rodales silvícolas. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas (≤ 0.05), se señala para cada fecha de muestreo en negrillas.

Temperatura del suelo

El comportamiento de la temperatura del suelo siguió una misma tendencia en los distintos rodales evaluados en el área de estudio, con registros bajos durante el muestreo de invierno, aumentos paulatinos durante primavera y estabilidad durante los muestreos correspondientes al verano y parte de otoño. La temperatura más baja registrada ocurrió en la fecha correspondiente al 21 de diciembre de 2019, variando de 3 a 6 °C y las temperaturas del suelo más altas observadas (18.5 a 34 °C) fueron durante el mes de mayo de 2020. La temperatura del suelo presentó diferencias en 25 de los 28 muestreos realizados (Fig. 4).

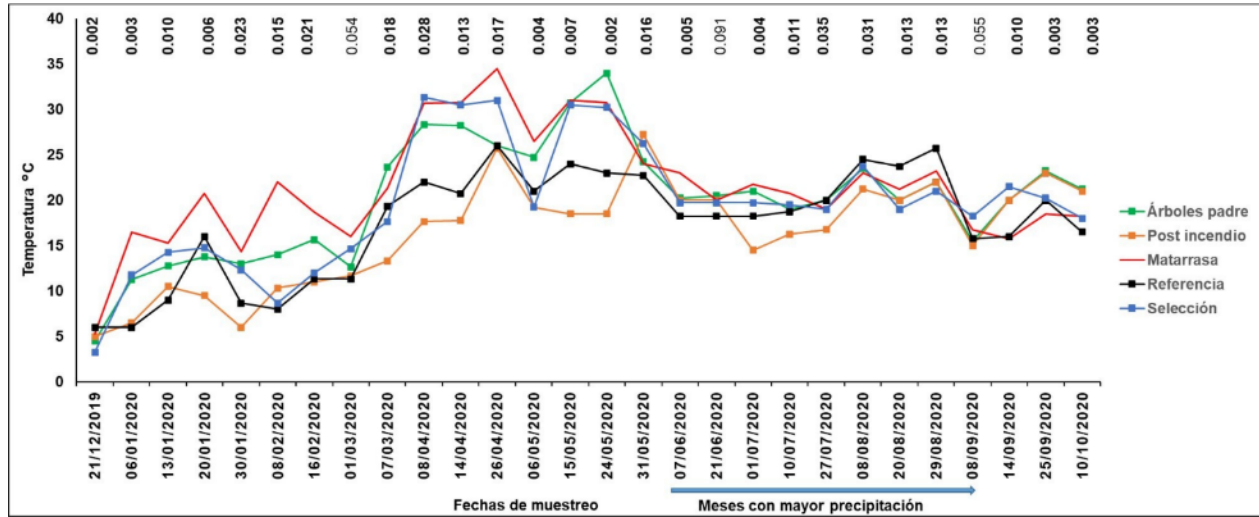


Fig. 3. Variación de la temperatura del suelo para los distintos rodales silvícolas. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas (≤ 0.05), se señala para cada fecha de muestreo en negrillas.

Humedad del suelo

Durante el periodo evaluado la humedad del suelo se comportó de manera más variable, fluctuando de manera general entre el 9 y 90%. Los registros de mayor humedad se produjeron en verano, el cual corresponde a la temporada de lluvias en la región, durante el intervalo de muestreos 7-16 (16 de febrero a 31 de mayo de 2020) presentó una notoria disminución coincidiendo con la época seca. La prueba de Kruskal-Wallis indicó que solo 8 muestreos presentaron diferencias significativas entre los rodales (Fig. 5).

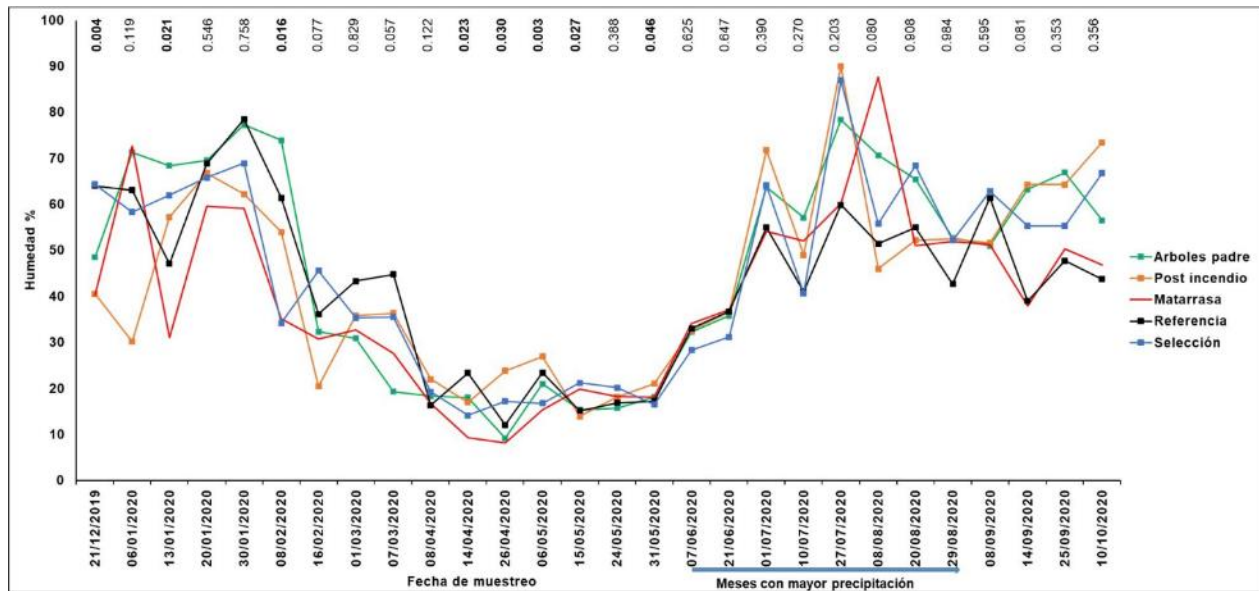


Fig. 4. Variación de la humedad del suelo para los distintos rodales. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas (≤ 0.05), se señala para cada fecha de muestreo en negrillas.

Correlaciones entre la temperatura, humedad y la respiración del suelo

La matriz de correlación de Spearman permite detectar que los flujos de CO₂ emitidos por la respiración del suelo se relaciona positivamente con la humedad y temperatura del suelo, con coeficientes de correlación del 0.272** y 0.700** respectivamente (Tabla 4).

Tabla 4. Coeficientes de correlaciones de Spearman entre la humedad, temperatura y respiración del suelo

Variables	Respiración del suelo ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Humedad (%)	Temperatura (°C)
Respiración del suelo ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	1.000	0.272**	0.700**
Valor de p	---	0.0001	0.0001
Humedad (%)	0.272**	1.000	0.108*
Valor de p	0.0001	---	0.011
Temperatura (°C)	0.700**	0.108*	1.000
Valor de p	0.0001	0.011	---

** Correlación significativa en el nivel 0.01, * correlación es significativa en el nivel 0.05

DISCUSIÓN

Los flujos de CO₂ observados en la respiración del Umbrisol son considerados como típicos para bosques templados y bajos en comparación con otro tipo de ecosistemas, pudiendo atribuirse a la composición y calidad de la materia orgánica y residuos leñosos, cambios en la densidad del rodal y variables como temperatura y humedad del suelo (Sun *et al.*, 2018; X. Zhang *et al.*, 2018).

El nivel de pH del Umbrisol es considerado como altamente ácido para todos los rodales analizados (Cuadro 1), coincidiendo con lo establecido por la WRB (2022) quien señala que el suelo Umbrisol posee niveles de pH muy bajos (<5.5). Lo anterior puede llegar a influir sobre los procesos de humificación y mineralización de la materia orgánica y en el desarrollo adecuado de los microorganismos del suelo, pudiendo reducir considerablemente las tasas de respiración del suelo, lo cual ha sido reportado por otros estudios con valores de pH menores a 5 (Zhang *et al.*, 2016; Barajas Guzmán *et al.*, 2020).

Los rodales aprovechados con las cortas de regeneración, así como en Post incendio presentaron tasas bajas de respiración promedio del suelo, respecto al rodal de Referencia, dicha tendencia ha sido reportada en otros estudios sobre respiración del suelo en zonas templadas y boreales. Zhang *et al.* (2018) señalan que los flujos de CO₂ son mayores durante los primeros dos años de recuperación de las masas forestales, pero no en etapas posteriores, debido principalmente a que los cambios en el piso forestal y las variables edáficas provocan una activación significativa de los organismos heterótrofos. Particularmente los rodales del presente estudio cuentan con una edad promedio de ocho años de ser sometidos el aprovechamiento y, en su caso, siniestrados por el incendio, tiempo en el cual pudo haberse estabilizado la actividad biológica del suelo. Aunado a lo anterior, los resultados del presente estudio concuerdan con Ma *et al.* (2013) quienes señalan que las cortas alteran en diferente proporción la densidad de los rodales, raíces vivas y entrada de materia orgánica a los suelos y por ende se reducen las emisiones de CO₂ que realizan las raíces y microorganismos asociados. Así mismo las reducciones de respiración del suelo pueden también ser atribuidas a cambios en la comunidad microbiana, tales como la aclimatación y adaptación microbiana (Mayer *et al.*, 2017).

En el presente estudio la respiración del suelo presentó correlaciones positivas con la temperatura y humedad del suelo lo cual provocó que la tasa de respiración presentará una variación estacional asociada principalmente a los cambios de temperatura y humedad del suelo, variables que dependen de varias características propias del sitio, por ejemplo, la densidad, exposición a la radiación, cobertura, viento o acumulación de materia orgánica, al igual que las diversas condiciones ambientales (Han *et al.*, 2018).

Particularmente en el periodo de diciembre-marzo la respiración del suelo presentó los flujos más bajos de CO₂, lo cual puede también estar atribuido principalmente a la ecología del ecosistema ya que durante el periodo invernal es cuando se reducen considerablemente los procesos biológicos relacionados con la respiración del suelo tales como como la actividad microbiana y el crecimiento de raíces (Oertel *et al.*, 2016; Monterroso *et al.*, 2022). Mientas que, los flujos bajos de CO₂ registrados en los meses de abril a mayo pueden estar atribuidos al impacto de la sequía de la región sobre la humedad y temperatura del suelo (Han *et al.*, 2018; Comisión Nacional del Agua, 2020). Lo anterior coincide con Tucker *et al.* (2019) quienes señalan que el comportamiento de las actividades biológicas en el interior del suelo se ven reducidas por bajos contenidos de humedad y/o cambios drásticos en la temperatura.

Por otra parte, se detectó un aumento significativo de la respiración a partir del inicio de la temporada de lluvias, dicho comportamiento ha sido reportado por Millan-Romero *et al.* (2018) y Lopera (2019), quienes lo relacionan con el aumento de la humedad del suelo, debido a sus efectos directos en la reactivación de procesos metabólicos de raíces y microorganismos del suelo. Además, procesos físicos como la desgasificación (efecto de la humedad del suelo que provoca la liberación de gases guardados en los poros del suelo) puede ser una fuente extra de emisión de CO₂ al iniciar la temporada de lluvias (Liu *et al.*, 2002; Cueva *et al.*, 2012; Yan *et al.*, 2019).

El rodal de Matarrasa registró la mayor temperatura promedio del suelo en comparación con los demás rodales evaluados, debido principalmente a la ausencia de la cobertura aérea, lo cual incrementó la intensidad de la radiación solar que llega al suelo (Wang *et al.*, 2011; Ma *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2018). Sin embargo, la humedad del suelo no presentó cambios significativos entre rodales, pudiendo estar relacionado con la estructura post cortas, ya que, al reducirse la densidad del arbolado, aumenta la temperatura y velocidad del viento, lo cual en combinación puede estimular la evaporación manteniendo una humedad del suelo equilibrada (Cheng *et al.*, 2015).

Los flujos de CO₂ promedios más bajos se encontraron en el área de Post incendio. La cual, además, pudo verse afectada por la etapa de crecimiento dinámica que experimenta el rodal, así como a su alta densidad, donde existe una acelerada caída y acumulación de hojarasca, interfiriendo en los procesos de microorganismos del suelo y las raíces, principalmente por la competencia del suministro de nutrientes (Wang *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados, las emisiones de CO₂ del suelo a la atmósfera se logran reducir de manera significativa posterior a la implementación de las cortas de regeneración.

Los flujos de CO₂ para el suelo evaluado Umbrisol son consideradas como típicas para bosques templados y bajas en comparación con otro tipo de ecosistemas, pudiendo atribuirse a las características del Umbrisol y a la composición y calidad de la materia orgánica (lignina, resina y celulosa los principales componentes), cuyas características recalitrantes afectan la dinámica de la actividad biológica.

En general la respiración del suelo se ve influenciada por cambios radicales en la temperatura, particularmente durante el periodo invernal y la sequía es cuando las emisiones de CO₂ se reducen significativamente.

A partir del inicio de la temporada de lluvias se incrementaron los flujos de CO₂ emitidos por la respiración del suelo, sugiriendo que los niveles de temperatura y humedad del suelo pudieron incidir en la creación de un ambiente edáfico apto para la actividad autótrofa y heterótrofa.

LITERATURA CITADA

- Barajas Guzmán, G., Hernández Rosales, D. C., Paredes García, S., Peña Becerril, J. C., & Álvarez Sánchez, J. (2020). CO₂ microbiano edáfico en un bosque de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en la Ciudad de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(57). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i57.552>
- Bond-Lamberty, B., & Thomson, A. (2010). Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 464(7288), 579–582. <https://doi.org/10.1038/nature08930>
- Brown, R., & Markewitz, D. (2018). Soil heterotrophic respiration: Measuring and modeling seasonal variation and silvicultural impacts. *Forest Ecology and Management*, 430, 594–608. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.018>
- Cantú, I., González, R. H., & Gómez, M. M. v. (2010). CO₂ efflux in vertisol under different land use systems. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12(2), 389–403.
- Cantú Silva, I., & Luna Robles, E. O. (2022). Nitrogen storage and C:N ratio of an Umbrisol under forest management in Durango, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(72), 82–111. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i72.1055>
- Cheng, X., Kang, F., Han, H., Liu, H., & Zhang, Y. (2015). Effect of thinning on partitioned soil respiration in a young *Pinus tabulaeformis* plantation during growing season. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214–215, 473–482. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.016>
- Comisión Nacional del Agua. (2020). *Inventario de Registros por Década Año. Estaciones climáticas*. Estación 10093.
- Cruz-Sánchez, Y., López-Teloxa, L. C., Gómez-Díaz, J. D., & Monterroso-Rivas, A. I. (2022). Respiration of CO₂ from the soil of temperate forests in the Iztaccihuatl-Popocatepetl National Park, Mexico. *Bosque*, 43(2), 125–133. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002022000200125>
- Cueva, A., Robles, C., Garatuza, J., & Yépez, E. (2016). Soil respiration in Mexico: Advances and future directions. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 253–269. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00253.pdf>
- Cueva, A., Yépez, E. A., Garatuza, J., Watts, C. J., & Rodríguez, J. (2012). Diseño y uso de un sistema portátil para medir la respiración de suelo en ecosistemas. *Terra Latinoamericana*, 39(4), 327–336.
- Darenova, E., & Čater, M. (2018). Different structure of sessile oak stands affects soil moisture and soil CO₂ efflux. *Forest Science*, 64(3), 340–348. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxx014>
- García, M. E. (1973). *Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. UNAM.
- González-Elizondo, M., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, I. (2022). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis. *Acta Botanica Mexicana*, 100, 351–403. <https://doi.org/10.21829/abm100.2012.40>
- Guerrero, P. L., Quintero, R., Espinoza, V., Valdés, G. S., & Sánchez, M. (2012). Respiración de CO₂ como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos de Lupinus. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 335–362.

- Han, M., Shi, B., & Jin, G. (2018). Conversion of primary mixed forest into secondary broadleaved forest and coniferous plantations: Effects on temporal dynamics of soil CO₂ efflux. *Catena*, 162, 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.004>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC]. (2013). *Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990-2010* (1st ed.). Printed in Mexico.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2005). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Pueblo Nuevo, Durango Clave geoestadística 10023*.
- IUSS Working Group WRB. (2022). *World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria*.
- James, J., & Harrison, R. (2016). The effect of harvest on forest soil carbon: A meta-analysis. *Forests*, 7(12). <https://doi.org/10.3390/f7120308>
- Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D. W., Minkinen, K., & Byrne, K. A. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 137(3–4), 253–268. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>
- Liu, X., Wan, S., Su, B., Hui, D., & Luo, Y. (2002). Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem. *Plant and Soil*, 240(2), 213–223. <https://doi.org/10.1023/A:1015744126533>
- Lopera, M. (2019). Flujo de CO₂ del suelo bajo diferentes coberturas de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(167), 234. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.823>
- López Hernández, J. A., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Monarrez Gonzalez, J. C., González-Tagle, M. A., & Jiménez-Pérez, J. (2017). Composición y diversidad de especies forestales en bosques templados de Puebla, México. *Madera y Bosques*, 23(1), 39. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311518>
- Lull, C., Bautista, I., Lidón, A., del Campo, A. D., González-Sanchis, M., & García-Prats, A. (2020). Temporal effects of thinning on soil organic carbon pools, basal respiration and enzyme activities in a Mediterranean Holm oak forest. *Forest Ecology and Management*, 464, 118088. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118088>
- Luna-Robles, E. O., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H., Marmolejo-Monsiváis, J., Yáñez-Díaz, M. I., Hernández, F. J., & Béjar-Pulido, S. J. (2021). Effects of forest management on the physical and hydrological properties of an Umbrisol in the Sierra Madre Occidental. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 27(1), 19–32. <https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2019.11.085>
- Ma, Y., Geng, Y., Huang, Y., Shi, Y., Niklaus, P. A., Schmid, B., & He, J. S. (2013). Effect of clear-cutting silviculture on soil respiration in a subtropical forest of China. *Journal of Plant Ecology*, 6(5), 335–348. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtt038>
- Mayer, M., Matthews, B., Rosinger, C., Sandén, H., Godbold, D. L., & Katzensteiner, K. (2017). Tree regeneration retards decomposition in a temperate mountain soil after forest gap disturbance. *Soil Biology and Biochemistry*, 115, 490–498. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.09.010>
- Millan-Romero, E., Salcedo-Martínez, L., & Millan-Paramo, C. (2018). Soil Respiration for Four Vegetation uses in the University of Sucre - Colombia. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(40), 1–10. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i40/130132>
- Monárrez-González, J. C., Pérez-Verdín, G., López-González, C., Márquez-Linares, M. A., & González Elizondo, M. (2018). Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y Bosques*, 24(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421569>
- Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F., & Erasmi, S. (2016). Greenhouse gas emissions from soils—A review. In *Chemie der Erde* (Vol. 76, Issue 3, pp. 327–352). Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>

Recibido:
10/enero/2023

Aceptado:
23/junio/2023

- Olajuyigbe, S., Tobin, B., Saunders, M., & Nieuwenhuis, M. (2012). Forest thinning and soil respiration in a Sitka spruce forest in Ireland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 157, 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.01.016>
- Sahagún, S. F., & Reyes, H. (2018). Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México. *Ciencia UAT*, 12(2), 6–21.
- Sun, Q., Wang, R., Hu, Y., Yao, L., & Guo, S. (2018). Spatial variations of soil respiration and temperature sensitivity along a steep slope of the semiarid Loess Plateau. *PLOS ONE*, 13(4), e0195400. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195400>
- Tucker, C. L., Ferrenberg, S., & Reed, S. C. (2019). Climatic Sensitivity of Dryland Soil CO₂ Fluxes Differs Dramatically with Biological Soil Crust Successional State. *Ecosystems*, 22(1), 15–32. <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0250-4>
- Vargas, R., Baldocchi, D. D., Allen, M. F., Bahn, M., Black, T. A., Collins, S. L., Yuste, J. C., Hirano, T., Jassal, R. S., Pumpanen, J., & Tang, J. (2010). Looking deeper into the soil: biophysical controls and seasonal lags of soil CO₂ production and efflux. *Ecological Applications*, 20(6), 1569–1582. <https://doi.org/10.1890/09-0693.1>
- Vargas, R., Detto, M., Baldocchi, D., & Allen, M. (2010). Multiscale analysis of temporal variability of soil CO₂ production as influenced by weather and vegetation. *Global Change Biology*, 16(5), 1589–1605. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02111.x>
- Wang, M., Liu, X., Zhang, J., Li, X., Wang, G., Li, X., & Chen, W. (2015). Soil respiration associated with plant succession at the meadow steppes in Songnen Plain, Northeast China. *Journal of Plant Ecology*, 8(1), 51–60. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtu006>
- Wang, X., Zhao, J., Wu, J., Chen, H., Lin, Y., Zhou, L., & Fu, S. (2011). Impacts of understory species removal and/or addition on soil respiration in a mixed forest plantation with native species in southern China. *Forest Ecology and Management*, 261(6), 1053–1060. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.12.027>
- Wang, Y., Zhu, X., Bai, S., Zhu, T., Qiu, W., You, Y., Wu, M., Berninger, F., Sun, Z., Zhang, H., & Zhang, X. (2018). Effects of forest regeneration practices on the flux of soil CO₂ after clear-cutting in subtropical China. *Journal of Environmental Management*, 212, 332–339. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.038>
- Yan, T., Song, H., Wang, Z., Teramoto, M., Wang, J., Liang, N., Ma, C., Sun, Z., Xi, Y., Li, L., & Peng, S. (2019). Temperature sensitivity of soil respiration across multiple time scales in a temperate plantation forest. *Science of the Total Environment*, 688, 479–485. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.318>
- Yáñez Díaz, M., Cantú Silva, I., González Rodríguez, H., Jurado, E., & Gómez Meza, M. V. (2017). Respiración del suelo en cuatro sistemas de uso de la tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(42). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i42.22>
- Zárate Malpica, A. H., & Miranda Zambrano, G. A. (2016). Impacto del cambio climático en la seguridad alimentaria en zonas campesinas vulnerables de los Andes del Perú. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(1), 71–82.
- Zhang, Q., Wu, J., Yang, F., Lei, Y., Zhang, Q., & Cheng, X. (2016). Alterations in soil microbial community composition and biomass following agricultural land use change. *Scientific Reports*, 6(1), 36587. <https://doi.org/10.1038/srep36587>
- Zhang, X., Guan, D., Li, W., Sun, D., Jin, C., Yuan, F., Wang, A., & Wu, J. (2018). The effects of forest thinning on soil carbon stocks and dynamics: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 429, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.06.027>