



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO Y
ALMACÉN DE CARBONO ORGÁNICO EN USOS DE
SUELOS FORESTALES**

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

YADIHRA CRUZ SÁNCHEZ

Bajo la supervisión de:

DR. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS



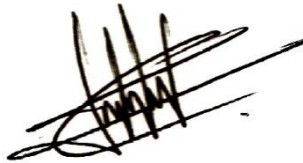
Chapingo, Estado de México, julio de 2020

ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO Y ALMACÉN DE CARBONO ORGÁNICO EN USOS DE SUELOS FORESTALES

Tesis realizada por **YADHRA CRUZ SÁNCHEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



DR. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

CODIRECTORA:



DRA. LETICIA CITLALY LÓPEZ TELOXA

ASESOR:



DR. JESÚS DAVID GÓMEZ DÍAZ

CONTENIDO

Contenido	iii
Índice de cuadros	vi
Índice de figuras	vii
Abreviaturas usadas	viii
Dedicatoria	x
Agradecimientos	xi
Datos bibliográficos	xii
Resumen general	xiv
Abstract	xv
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Planteamiento del problema de investigación	3
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos.....	4
1.5. Hipótesis.....	5
1.6. Contenido temático.....	5
1.7. Literatura citada	6
CAPÍTULO 2.....	8
2. MARCO TEÓRICO Y DE REFERENCIA.....	8
2.1. Gases de efecto invernadero	8
2.2. Dióxido de carbono proveniente del suelo	9
2.3. Técnicas de cuantificación de gases de efecto invernadero en suelos	14
2.4. Almacenamiento de carbono orgánico en suelos forestales	16

2.5. Literatura citada	18
CAPÍTULO 3.....	22
3. RESPIRACIÓN DEL SUELO EN UN BOSQUE TEMPLADO DEL CENTRO DE MÉXICO DURANTE INVIERNO Y PRIMAVERA	22
3.1. Ideas destacadas:.....	22
3.2. Resumen	22
3.3. Introducción	23
3.4. Materiales y métodos.....	25
3.5. Resultados y discusión	29
3.6. Conclusiones	35
3.7. Reconocimientos	35
3.8. References	35
CAPÍTULO 4.....	40
4. RESPIRACIÓN DEL SUELO EN ECOSISTEMAS FORESTALES TEMPLADOS DE MÉXICO Y SU RELACIÓN CON CARBONO ORGÁNICO...40	40
4.1. Resumen	40
4.2. Abstract	41
4.3. Introducción	42
4.4. Objetivos.....	44
4.5. Materiales y métodos.....	44
4.6. Resultados.....	48
4.7. Discusión	51
4.8. Conclusiones	59
4.9. Reconocimientos	60

4.10. Referencias	60
CAPÍTULO 5.....	72
5. CONCLUSIONES GENERALES	72

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Respiración del suelo (Rs), temperatura del suelo (Ts) y humedad del suelo (Hs) según la cobertura vegetal y época del año.	32
Cuadro 2. Coeficientes de correlación de Sperman para 540 valores obtenidos de 6 variables por temporada estudiada.....	34
Cuadro 3. Carbono orgánico edáfico (COS) de horizonte de 0-30 cm, respiración anual del suelo (Rs) y condiciones del terreno de los rodales muestreados en el bosque templado de Zoquiapan (valores medios y desviación estándar).....	69
Cuadro 4. Variables ambientales y del suelo de los rodales muestreados en el bosque templado de Zoquiapan (valores medios y desviación estándar) .	71
Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre la respiración del suelo y las variables climáticas del suelo (Zoquiapan)	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del contenido de titulación ...	Error! Marcador no definido.
Figura 2. Diagramas de caja de variabilidad de la Rs por cobertura vegetal (1,2 y 3 en el eje X) para la temporada de invierno (a), n = 51, CV: 19.53%), primavera (b), n = 39, CV:28.67%) y por temporada del año (c), n=90, CV: 50.08%).....	30
Figura 3. a) Relaciones entre la Rs y la Ts por temporada y cobertura vegetal; b) Relaciones entre la Rs y la Hs por temporada y cobertura vegetal.....	33
Figura 4. Variación espacial de carbono orgánico edáfico por profundidad en los sitios estudiados en el bosque templado de Zoquiapan	69
Figura 5. Variación estacional de la respiración del suelo en los sitios estudiados en el bosque templado de Zoquiapan.....	70
Figura 6. Relación entre la respiración y el carbono orgánico del suelo en los rodales del bosque templado.....	70

ABREVIATURAS USADAS

Abreviatura	Significado
μmol	micromol
AIC	criterio de información de Akaike
ANOVA	análisis de varianza
BA	bosque de <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. et Cham
BP	bosque de <i>Pinus hartwegii</i> Lindl
BPA	bosque de <i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>
BPAA	bosque de <i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i> y <i>Alnus firmifolia</i> Fernald
BPO	bosque de <i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>
BPOA	bosque de <i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i> y <i>Alnus firmifolia</i> Fernald
C	carbono
cm	centímetros
cm ³	centímetros cúbicos
CO	carbono orgánico
CO ₂	dióxido de carbono
COS	carbono orgánico del suelo
CV	coeficiente de variación
d	día
Dap	densidad aparente del suelo
EC	tasa de emisión
EFEZ	Estación Forestal Experimental Zoquiapan
g	gramos
GEI	gases de efecto invernadero
Gg	gigagramos
ha	hectárea
Ha	humedad relativa
Hr	humedad relativa
Hs	humedad del suelo
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGYCEI	Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero

Abreviatura	Significado
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
Izta–Popo	Iztaccihuatl-Popocatepetl
kg	kilogramos
m	metro
m ²	metro cuadrado
Mg	megagramos
mm	milímetros
MO	materia orgánica
msnm	metros sobre el nivel del mar
Tg de CO ₂ e	millones de toneladas de CO ₂ equivalente
NCOS	de nuevo carbono orgánico del suelo
Pss	peso de suelo seco
R	radiación solar
Ra	respiraciones autótrofas
Rh	respiraciones heterótrofas
Rs	respiración del suelo
s	segundo
SAS	<i>Statistical Analysis System</i>
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Ta	temperatura ambiente
TCMA	tasa de crecimiento media anual
Tg	Teragramos
Ts	temperatura del suelo
TSR	respiración total del suelo
USCUSS	Uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
Vv	velocidad del viento

DEDICATORIA

A los mejores padres Rafael Cruz Rodríguez y Anselma Sánchez Burciaga por su apoyo incondicional, por sus enseñanzas, ejemplo de vida y amor que me permitió ser la persona que ahora soy. Gracias por confiar en mí.

A mi hijo Dorian Elías Lara Cruz por todo el amor y comprensión que me ha dado y por ser la luz y motor de mi vida.

A mis hermanos René y Noé por su gran apoyo en los buenos y malos momentos de mi vida.

Además, doy gracias a Dios por darme vida y salud para continuar con el largo camino llamado vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo por forjarme como la profesionista que ahora soy.

A la Coordinación del posgrado de la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales por el apoyo brindado que me permitió finalizar mis estudios de posgrado.

A la División de Ciencias Forestales y al Departamento de Suelos por su apoyo incondicional.

Al Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas por compartirme los conocimientos necesarios, las herramientas indispensables, por su trabajo, tiempo y paciencia que nos permitieron cumplir con el objetivo. Por sus consejos y por ser una excelente persona con la cual sin duda volvería a trabajar.

A la Dra. Leticia Citlaly López Teloxa por su apoyo incondicional, por su entrega al proyecto y por ser parte fundamental de este trabajo. Por su gran amistad y por su excelente calidad humana.

Al Dr. Jesús David Gómez Díaz por su tiempo y conocimientos transmitidos que sin duda fueron de gran ayuda. Por su amistad, amabilidad y los consejos que me dio.

A la Dra. Ma. Amparo Máxima Borja de la Rosa, por el gran apoyo que me brindó.

Al personal de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan por su apoyo en la realización del trabajo de campo.

Especialmente a Paty por su apoyo, nobleza y amistad.

DATOS BIBLIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Yadihra Cruz Sánchez
Fecha de nacimiento	04 de octubre de 1988
Lugar de nacimiento	San Bernardo, Durango, México
No. Cartilla militar	No aplica
CURP	CUSY881004MDGRND00
Profesión	Ingeniero Forestal
Cédula profesional	11138949

Desarrollo académico

Bachillerato	Universidad Autónoma Chapingo
Licenciatura	Universidad Autónoma Chapingo

Desarrollo profesional

PROTECTORA DE BOSQUES (PROBOSQUE)
Coordinador Regional B
Técnico de Plantaciones forestales comerciales en el
Estado de México
marzo 2017-julio 2018
Metepéc, Estado de México

CONSULTORES PARA LA INVESTIGACIÓN
APLICADA Y EL DESARROLLO
Técnico administrativo
Administración y seguimiento de proyectos de
Compensación Ambiental por Cambio de Uso de
Suelo.
Asistente técnico, seguimiento y control de calidad del

Inventario Nacional de Plantaciones Forestales en México.

enero 2015- agosto 2016

Texcoco, Estado de México

PRINDES, PROYECTOS INTEGRALES PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE

Ayudante Técnico

Elaboración de Cartografía Digital

Atlas Municipal de Riesgos

Oct 2014-enero 2015

Texcoco, Estado de México

AGROS DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN S DE RL DE CV.

Proyectista y supervisor de campo

Proyectista

Diseño de sistemas de riego

nov 2013-sep 2014

Texcoco, Estado de México

RESUMEN GENERAL

ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO Y ALMACÉN DE CARBONO ORGÁNICO EN USOS DE SUELOS FORESTALES

Los ecosistemas forestales juegan un papel importante en el ciclo global del carbono, por lo que entender el intercambio de flujos de CO₂ del suelo hacia la atmósfera, y el carbono orgánico almacenado en el suelo de este tipo de ecosistemas, proporciona información útil en la toma de decisiones enfocadas a la realización de prácticas de manejo y conservación forestal. El propósito de la investigación fue analizar la variación espacial y temporal de las emisiones de CO₂ y carbono orgánico del suelo de un ecosistema templado representativo de México, como es la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, así como evaluar la influencia que ejercen diferentes factores propios de cada sitio, como son las condiciones climáticas y el tipo de vegetación presente. El carbono orgánico del suelo se obtuvo mediante la toma de muestras y se determinaron mediante el analizador de carbono orgánico total (TOC-V, Shimadzu Labs), equipado con un módulo de muestras sólidas (modelo SSM-5000, Shimadzu Labs). Las emisiones de CO₂ del suelo se midieron con una cámara dinámica cerrada modelo LI-COR 8100A (LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA), integrada con dos sensores modelo *Soil Temperature Probe* y *Theta Soil Moisture Probe* para registrar la temperatura y humedad del suelo, respectivamente. Para obtener datos climatológicos del área estudiada se utilizaron dos estaciones meteorológicas automáticas Davis Instruments, modelo *Vantage Pro2 Plus*. Los resultados muestran que el carbono orgánico del suelo varió de 163.09 a 207.45 Mg ha⁻¹, siendo mayor en los rodales de masas mixtas. La respiración del suelo fluctuó entre 39.27 y 67.96 Mg ha⁻¹ año⁻¹ con mayores cantidades emitidas en rodales de masas puras. El carbono orgánico del suelo presentó correlación negativa con la respiración del suelo. Mientras que los cambios en este último sugieren una fuerte dependencia al escenario ambiental con base en la época del año y del rodal.

Palabras clave: respiración del suelo; COS; dióxido de carbono; Li-Cor 8100A; bosque templado.

ABSTRACT

ESTIMATION OF CARBON DIOXIDE EMISSIONS AND ORGANIC CARBON STORAGE IN FOREST SOIL USES

Forest ecosystems play an important role in the global carbon cycle, so understanding the exchange of CO₂ fluxes from the soil to the atmosphere and the organic carbon stored in the soil of this type of ecosystem provides useful information in decision-making focused on carrying out forest management and conservation practices. The purposes of this research were to analyze the spatial and temporal variation of CO₂ and organic carbon emissions from the soil of a temperate Mexican representative ecosystem in the Zoquiapan Experimental Forest Station, as well as to evaluate the influence of different factors specific to each site, such as climatic conditions and the type of present vegetation. Soil organic carbon was determined using the total organic carbon analyzer (TOC-V, Shimadzu Labs), equipped with a solid sample module (model SSM-5000, Shimadzu Labs). Soil CO₂ emissions were measured with a closed dynamic chamber model LI-COR 8100A (LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA), integrated with two sensors model *Soil Temperature Probe* and *Theta Soil Moisture Probe* to record the soil temperature and humidity, respectively. Two automatic meteorological stations Davis Instruments model Vantage Pro2 Plus were used to obtain climatological data at the study area. The results show that organic carbon in the soil ranged from 163.09 to 207.45 Mg ha⁻¹, being higher in stands of mixed cover. Soil respiration fluctuated between 39.27 and 67.96 Mg ha⁻¹ yr⁻¹, with higher amounts emitted in stands of monospecific cover. Soil organic carbon correlated negatively with soil respiration. The changes in the latter suggest a strong dependence on the environmental scenario based on the season of year and the stand.

Key words: soil respiration; COS; carbon dioxide; Li-Cor 8100 A; temperate forest.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

A nivel mundial se ha acelerado la concentración de gases efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, considerados como los principales causantes del cambio climático global, enfatizando principalmente en el dióxido de carbono (CO₂) (Liebermann et al., 2020). Este gas está estrechamente relacionado con la vegetación y el suelo, especialmente por la capacidad de estos de fijar carbono (C) atmosférico, y el rol que juegan al ser la segunda fuente de emisiones de CO₂ (después de la quema de combustibles fósiles: petróleo, carbón mineral y gas natural) debido a los incendios naturales o antropogénicos, así como los procesos de industrialización y la destrucción de bosques o cambios en el uso del suelo (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2007).

La influencia de las actividades humanas han generado grandes cambios del medio ambiente de forma considerable, provocando un aumento de gases en la atmósfera, principalmente dióxido de carbono (Ordóñez, De Jong, & Masera, 2001). Se ha estimado que el cambio de uso de suelo es uno de los principales factores que contribuyen con las emisiones de CO₂ de la superficie del suelo (Kwak et al., 2019). Sin embargo, de acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) las absorciones por las permanencias de las tierras forestales, pastizales y tierras agrícolas fueron de 72,997.6 Gg de CO₂ y las emisiones netas del sector Uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (USCUSS) fueron de -141,536.00 Tg de CO₂e, lo que convierte a este sector en un fuerte reservorio de captación de carbono (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2007).

El clima, el tipo de vegetación y el uso de suelo son los principales factores que influyen en el intercambio de este gas del suelo hacia la atmosfera. Aunado a esto, la variación de la temperaturas del aire y del suelo y la precipitación anual causa incrementos en la respiración del suelo o flujo de suelo (Raich & Schlesinger, 1992), además se correlaciona positivamente. El aumento en la

temperatura y humedad del suelo arrojaron datos más altos de emisiones de CO₂ según se comprobó en un bosque de abetos noruegos donde la temperatura del suelo es quien causó la mayor variación estacional en flujo de salida de CO₂ en el suelo (Acosta, Darenova, Krupková, & Pavelka, 2018). Por otra parte, los suelos con mayor concentración de carbono orgánico presentan los valores más elevados de emisiones de CO₂ (Galicia et al., 2016) debido a que los procesos que producen este gas en el suelo están asociados al metabolismo de la comunidad microbiana de suelo y la respiración de las raíces. De igual forma el aporte de carbono a través de la hojarasca al suelo favorecen la acumulación de materia orgánica. En los suelos que contienen alofano, este material funge como principal controlador de la estabilización del C orgánico, este mineral interactúa con la materia húmica del suelo disminuyendo la mineralización del carbono orgánico del suelo (COS) y con ello es mayor su acumulación en el suelo (Galicia et al., 2016).

Así pues, el propósito de la presente investigación fue determinar las emisiones de CO₂ y COS almacenado en un suelo forestal en diferentes coberturas vegetales con el fin de analizar su comportamiento a raíz de los factores específicos del sitio.

1.1. Antecedentes

Históricamente las emisiones de gases de efecto invernadero se han medido utilizando cámaras estáticas, las cuales requerían de intensiva mano de obra y de las que se obtenía una baja resolución temporal de los datos. Actualmente se tiene uno de los sistemas de cámaras de monitoreo a largo plazo disponibles en los mercados y ampliamente utilizado es Li-Cor 8100A (LICOR Biosciences, Inc., Lincoln, NE) empleada en las mediciones de flujo de CO₂ en campo (Cueva-Rodríguez, Yépez, Garatuza-Payán, Watts, & Rodríguez, 2012). Por su parte el análisis del carbono orgánico almacenado en el suelo, que aunque ha sido estudiado más ampliamente, desde bosques tropicales hasta los templados (Galicia et al., 2016), la combinación de estas variables aún se encuentra escasa, aun siendo relevante para las estimaciones de la respiración global del suelo y

que además constituyen un componente importante dentro del balance del carbono.

La Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ) siendo un centro de investigación de la Universidad Autónoma Chapingo, tiene como principal objetivo desarrollar investigación y monitoreo permanente del ecosistema templado, fungiendo como una fracción representativa que presenta información geográfica y ecológica descriptiva de la zona y que además representa la principal fuente de datos con la que cuenta el Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl.

1.2. Planteamiento del problema de investigación

¿Cómo la variación estacional y de vegetación del bosque templado de la EFEZ, puede influir en el comportamiento de la emisiones de CO₂ y en la cantidad de carbono orgánico almacenado en el suelo?

1.3. Justificación

El cambio de uso de suelo provoca que los suelos forestales se conviertan en fuentes importantes de CO₂ (Kwak et al.,2019). En el caso particular de México, se presenta una tasa de deforestación entre 0.37 y 1.5 millones de hectáreas anuales, principalmente a causa de incendios tanto naturales como antropogénicos, y el cambio de uso del suelo, que son los más ofensivos y frecuentes, esto provee una fuente constante de CO₂ a la atmósfera (Rojo, Jasso, & Velásquez, 2003).

En la actualidad se han realizado diferentes investigaciones relacionadas con las emisiones de GEI, así como el impacto que tienen a nivel global, sin embargo, en México este tema está enfocado principalmente a la contaminación de las grandes urbes y en cuanto a usos de suelo, se enfoca principalmente a tierras de uso agrícola por su grado de alteración del suelo, mediante el uso de químicos para mejora de la calidad del este. A raíz de esto surgió la necesidad de conocer cómo se comportan las emisiones de CO₂ en la superficie del suelo en los

bosques, sabiendo que no solo son importantes sumideros de carbono, sino que también emiten grandes cantidades de este gas dependiendo de diferentes factores, como la cantidad de materia orgánica (MO) contenida en el suelo y el tipo de vegetación presente, así como los factores ambientales y del suelo como temperatura y humedad.

Así pues, el mayor mérito de la presente investigación es que permitió conocer el comportamiento de las emisiones de CO₂ edáficas en distintas coberturas vegetales y variaciones estacionales, así como la cantidad de carbono orgánico almacenado en suelos de diferentes rodales representativos de un ecosistema templado. Con lo anterior, se tendrá información detallada sobre emisiones de CO₂ y carbono orgánico en suelos forestales, que permita ser más específicos en los factores de cálculo nacionales del INEGYCEI, así como acentuar mejores prácticas de manejo y conservación forestal.

1.4. Objetivos

General

- Determinar las emisiones de CO₂ y COS almacenado en un suelo forestal a partir de la observación *in situ* y laboratorio en diferentes coberturas vegetales para analizar su comportamiento a raíz de los factores específicos del sitio.

Particulares

- Medir y comparar las emisiones CO₂ de cuatro coberturas vegetales en cuatro temporadas del año utilizando una cámara cerrada y métodos estadísticos para conocer la variabilidad espacio-temporal de carbono del bosque.
- Medir el contenido de carbono orgánico almacenado en el suelo con el equipo TOC en cuatro coberturas vegetales para hacer un análisis emisiones de CO₂ – COS del sitio.

- Determinar la influencia de variables ambientales en los cambios en el flujo de CO₂ del suelo mediante pruebas estadísticas que permita visualizar la interacción entre dichas variables.

1.5. Hipótesis

- Habrá más emisiones de CO₂ del suelo en coberturas vegetales densas que en masas aclaradas y se presentará mayor flujo edáfico durante la temporada de verano.
- Habrá más carbono orgánico almacenado en coberturas vegetales densas que en masas aclaradas y a mayor contenido de COS habrá mayores emisiones de CO₂ en la superficie del suelo.
- La temperatura y humedad del suelo tendrán más influencia sobre las emisiones de CO₂ del suelo que otras variables ambientales.

1.6. Contenido temático

La introducción general (Capítulo 1) hace referencia a un contexto amplio del tema de investigación, abarcando conceptos generales que es necesario conocer para entender el tema del cual se aborda en el documento. Aquí se incluyen los antecedentes del tema, el planteamiento del problema, la justificación del estudio, los objetivos a cumplir, las preguntas de investigación, así como las hipótesis. Mientras que el marco teórico y de referencia, engloba una serie de publicaciones enfocadas al estudio del tema en cuestión en forma resumida, abarcando los aspectos más relevantes de dichas investigaciones, de tal manera que permite crear un aspecto general del avance en el estudio del tema.

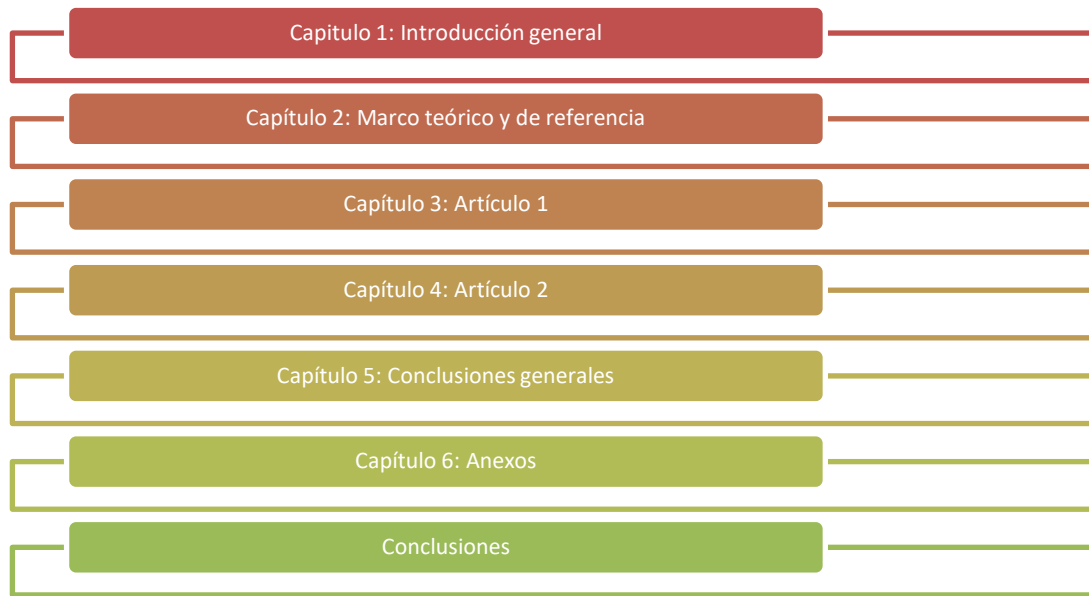


Figura 1. Estructura del contenido de titulación

1.7. Literatura citada

- Acosta, M., Darenova, E., Krupková, L., & Pavelka, M. (2018). Seasonal and inter-annual variability of soil CO₂ efflux in a Norway spruce forest over an eight-year study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256–257(March), 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.03.005>
- Cueva-Rodríguez, A., Yépez, E. A., Garatuza-Payán, J., Watts, C. J., & Rodríguez, J. C. (2012). Diseño y uso de un sistema portátil para medir la respiración de suelo en ecosistemas. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 327–336.
- Galicia, L., Gamboa, A., Cram, S., Chávez, B., Peña, V., Saynes, V., & Christina, S. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1–29. Retrieved from <http://www.revistas-conacyt.unam.mx/terra/index.php/terra/article/viewFile/73/79>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2007). Opciones de captura de carbono en el sector forestal. Retrieved from <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/437/bernardus.html>
- Kwak, J. H., Lim, S. S., Baah-Acheamfour, M., Choi, W. J., Fatemi, F., Carlyle, C. N., Bork, E. W. y Chang, S. X., 2019. Introducing trees to agricultural lands increases greenhouse gas emission during spring thaw in Canadian agroforestry systems. *Science of the Total Environment*, [e-journal] 652, pp.800–809. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.241>

- Liebermann, R., Breuer, L., Houska, T., Kraus, D., Moser, G. y Kraft, P., 2020. Simulating long-term development of greenhouse gas emissions, plant biomass, and soil moisture of a temperate grassland ecosystem under elevated atmospheric CO₂. *Agronomy*, 10(1), pp.1–17.
- Ordóñez, J. A., De Jong, B., & Masera, O. (2001). Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques*, 7(2), 27–47. <https://doi.org/10.3113/FAI.2008.0390>
- Raich, j. W., & schlesinger, w. H. (1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 44(2), 81–99. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1992.t01-1-00001.x>
- Rojo, G. E., Jasso, J., & Velásquez, A. (2003). Las masas forestales como sumideros de CO₂ ante un Cambio Climático Global. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 9(1), 57–67.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO Y DE REFERENCIA

El presente capítulo se organiza con base a las palabras claves definidas acorde al tema de investigación que permitieron realizar una búsqueda de las principales investigaciones, metodologías y manuales a través de buscadores como Scopus, ScieceDirect, Google Académico, entre otros, de donde se obtuvo la información más relevante y actual del tema. Las palabras clave elegidas fueron, respiración del suelo, COS, dióxido de carbono, Li-Cor 8100A, bosque templado.

Con este método se logró una revisión de 150 referencias aproximadamente, donde se destacan 50 referencias citadas en el presente documento, que fueron publicadas en los últimos 5 años. Esto permitió otorgarles validez y rigor científico a los resultados obtenidos en el proceso de estudio y análisis.

El objetivo del capítulo es dar cuenta de las principales investigaciones llevadas a cabo a nivel mundial y en México a cerca de las emisiones de CO₂ en la superficie de un suelo con vocación forestal, abarcando temas relacionados con estas mediciones que van desde cambio climático, emisiones de gases de efecto invernadero, mediciones de CO₂ en suelos forestales, variabilidad en métodos e instrumentos de medición, hasta llegar al tema principal.

2.1. Gases de efecto invernadero

Las actividades humanas han provocado cambios del medio ambiente de forma considerable. Su influencia en el aumento de gases a la atmosfera, principalmente dióxido de carbono, proveniente la quema de combustibles fósiles y el cambio en el uso del suelo (Ordóñez, De Jong, & Masera, 2001), ha intensificado la acción del llamado “efecto invernadero”. Lo que ha provocado el cambio climático global, esto genera diferentes problemas como son: alteraciones significativas en el clima mundial, aumento de la temperatura terrestre, rebrote de enfermedades, etc.

De acuerdo con el INEGYCEI que se realiza de acuerdo con los lineamientos y metodologías establecidos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), para el periodo 1990-2015, las emisiones directas de GEI en el país, sin considerar las absorciones, ascendieron a 683 millones de toneladas de CO₂ equivalente, de las cuales la mayor contribución se debe al autotransporte, con 23.4%, seguido por las actividades de generación de energía eléctrica con 18.3%, ganadería con 10.3% y residuos con 6.7 por ciento. Entre 1990 y 2015, las emisiones totales de GEI incrementaron en 54%, a una tasa de crecimiento media anual (TCMA) de 1.7 por ciento. Sin embargo, en los últimos años se observa un desaceleramiento, ya que entre 2010 y 2015 las emisiones aumentaron 4% y la TCMA fue de 0.8%, cuando entre 2005 y 2010 las emisiones crecieron 13.6% con una TCMA de 2.6 por ciento (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT); Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2018).

El aumento del CO₂ y otros GEI (i.e. metano y óxido nitroso) están relacionados con el incremento de cerca de 1 °C en la temperatura media del planeta, si se toman como referencia las concentraciones y temperaturas preindustriales; sin embargo, esta temperatura podría incrementarse hasta en 4 °C hacia finales de este siglo si no se llevan a cabo políticas de reducción de emisiones de GEI y de crecimiento poblacional (Delgado-Balbuena et al., 2018)

2.2. Dióxido de carbono proveniente del suelo

La respiración total del suelo (TSR) o flujos de CO₂ desde el suelo representa el enlace crítico en el ciclo de los elementos entre los organismos autótrofos, que reducen el CO₂ para formar compuestos orgánicos, y los organismos heterótrofos, que oxidan los compuestos orgánicos en el caso de la liberación de CO₂ (Rochette et al., 1997).

La respiración del suelo (Rs) se considera un buen estimador de la actividad biológica general y se ha propuesto como un descriptor de la calidad del suelo

(Hatfield, Baker, Rochette, & Hutchinson, 2005). Para los bosques la cantidad de carbono emitido por los suelos forestales depende en gran medida de la temperatura del suelo, la humedad del suelo y la materia orgánica total del suelo, siendo los reguladores importantes de los procesos metabólicos subterráneos. La respiración del suelo forma parte del ciclo del carbono en los bosques, que es afectado por las perturbaciones naturales ya que cambia la estructura del paisaje de inmediato, lo que da como resultado cambios rápidos en las magnitudes y direcciones en los flujos del carbono y el almacenamiento, tales como los incendios forestales, los brotes de insectos, etc. Por otro lado, los principales agentes de perturbación antropogénica como la deforestación y los diferentes tipos de manejo de la tierra tienen influencia directa en el ciclo del carbono (J.C. Azevedo et al. (eds.), 2014).

Investigar la influencia de la temperatura, precipitación y vegetación en el flujo anual de CO₂ de los suelos es un tema que en el año 1992 aún estaba poco estudiado; sin embargo, existe un estudio realizado en ese año acerca del tema en ecosistemas terrestres y humedales, donde los resultados de la investigación a una escala global indican que la respiración del suelo se correlaciona positivamente con las temperaturas del aire y la precipitación anual. Las actividades humanas como el uso de la tierra, la fertilización del suelo, la irrigación y el drenaje, así como los cambios climáticos tienen cierto impacto en las tasas de respiración del suelo (Raich & Schlesinger, 1992).

En Oregón, Estados Unidos, en los años 1996 y 1997 se realizó un estudio de flujos en un bosque de pino ponderosa, se utilizó la cámara LICOR 6200 IRGA, donde se midieron los flujos de CO₂ de los suelos, el follaje y la madera con cámaras periódicas a lo largo de un año. En este estudio se reportó oscilaciones entre 2.0 y 3.0 $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ (Law, et al., 1999).

Por otro lado, Bond-Lamberty & Thomson, (2001) realizaron una base de datos acerca de los datos disponibles publicados de la respiración del suelo tomados en campo a nivel global. Esta base de datos comprende desde 1961 hasta el 2007 con 818 estudios incluidos, en diferentes ecosistemas como desierto,

bosques, sabana, humedales, matorral y praderas; la mayor parte de estos estudios fueron hechas en EE. UU., Canadá y China.

Así mismo DeFries et al., (2002), midieron los flujos provenientes de la deforestación para los años 1980 y 1990 a nivel mundial utilizando estimaciones de subpíxeles del porcentaje de cobertura arbórea derivadas de datos satelitales (radiómetro avanzado de muy alta resolución de la administración nacional oceánica y atmosférica) en combinación con un modelo de carbono terrestre. Los resultados indican que la tasa neta de tala de bosques tropicales aumentó aproximadamente un 10% desde la década de 1980 hasta la de 1990.

El avance en la detección remota por satélite en la India se está empleando para detección de incendios y la evaluación de los daños. Los datos que se obtienen de dichos satélites se utilizan para monitorear y evaluar los incendios forestales, mismos que se extrajeron para crear estadísticas y estimar las emisiones de CO₂. En la Reserva de la Biosfera Similipal en la India se realizó una estimación de las emisiones de carbono a causa de los incendios forestales utilizando su base de datos espaciales sobre el área quemada de este bosque. Para el cálculo de estas emisiones se consideró la ecuación de Seiler y Crutzen, 1980, cuyos resultados muestran que el tipo de bosque de hoja caduca contribuye con las principales emisiones con un 76.3 %, de los cuales el 32.8% proviene de bosques caducifolios densos húmedos y 24.1 de bosques caducifolios secos (Saranya, Reddy, & Rao, 2016).

Otro de los estudios más recientes que involucra la medición del flujo de CO₂, fue realizado en el suelo de un bosque de abetos noruegos durante 8 años elaborado por Acosta, et al., (2018). Las mediciones obtenidas fueron mediante cámaras cerradas automatizadas de salida de CO₂. El sistema constaba de ocho cámaras y unidades de control para el cierre de la cámara, un analizador de gas infrarrojo (Li-840, LI-COR, Lincoln, NE, EE. UU.). Del 2005 al 2012 se llevaron a cabo mediciones de flujo en cada temporada, comenzando a principio de primavera y concluyendo a finales de otoño. Finalmente se obtuvieron cifras de parámetros como temperatura, humedad, precipitación, entre otros factores climáticos que

controlan la dinámica del carbono en el área, de los cuales la temperatura del suelo es quien causa la mayor variación estacional en flujo de salida de CO₂ en el suelo. Los resultados apoyan el uso de sistemas automatizados para el flujo de salida de CO₂ del suelo porque permiten mediciones precisas de CO₂, una perturbación mínima de la superficie del suelo y conjuntos de datos de alta resolución durante períodos de tiempo prolongados para evaluar mejor los factores ambientales que influyen en el flujo de salida de CO₂.

2.2.1. Escenario en México

Los flujos de carbono y los procesos de estabilización son escasamente estudiados en ecosistemas templados. En México, Saynes et al. (2012), Gamboa y Galicia (2011; 2012) examinaron el efecto del manejo forestal y el cambio de uso de suelo sobre los flujos de CO₂ y la microbiota del suelo.

Pajares & Etchevers, (2006), realizaron una investigación para valuar y comparar la tasa de emisión de CO₂ (EC) de suelos de origen volcánico en ecosistemas naturales y en tepetates preparados para la producción agrícola, manipulados con varios sistemas alternativos, en el Eje Neovolcánico Mexicano: una toposecuencia en el volcán del Tláloc-Telapón (Estado de México) y unas parcelas de tepetate habilitado para la agricultura en Tlalpan (Estado de Tlaxcala). El EC del suelo se obtuvo mediante un sistema de respiración de suelo 'SRS' (PP Systems, Stotfolt, G.B.). Los resultados mostraron que la EC es proporcional a la concentración de carbono del suelo. La EC en los sistemas naturales fue 30 a 50 % mayor que en los tepetates cultivados. En los tepetates cultivados el EC es más bajo en las parcelas que presentan menor concentración de COS.

Covaleda & Prat, (2009) estudiaron la dinámica estacional del flujo de CO₂ edáfico en un transecto altitudinal de suelos volcánicos bajo bosques de pino-encino con diferente nivel de degradación y en pastizales de Michoacán (México). Se buscó una relación de las emisiones de CO₂ con algunos factores ambientales (humedad y temperatura edáfica) y su uso como componente dinámico del carbono orgánico edáfico para relacionarlo con los almacenes de este en el suelo.

Se seleccionaron 4 sitios forestales que visualmente presentaban diferentes densidades arbóreas y diferente intensidad de intervención antrópica, adicionalmente se seleccionaron dos áreas de pastizal. El flujo de CO₂ edáfico fue medido con un sistema de respiración del suelo 'SRS' (PP Systems, Stotfold, Gran Bretaña), el cual consiste en un analizador portátil infrarrojo de gas y una cámara de respiración del suelo que contiene una pequeña bomba de succión del aire. Al comparar entre usos del suelo el pastizal fue el que presentó generalmente mayores valores de emisión, seguido del bosque mejor conservado y poco degradado. La humedad edáfica presentó una correlación positiva significativa con el flujo de CO₂, la temperatura no presentó relación con el flujo de CO₂.

Por otra parte, los incendios forestales en México generan emisiones tóxicas para el medio ambiente, entre otros, carbono orgánico y carbono negro para los que se tiene un estimado potencial de calentamiento global de cercano a 5000 W m⁻² g⁻¹ año, del año 2000 al 2012. En promedio los resultados obtenidos son de 5955 Mg año⁻¹ de carbono negro y 62 085 Mg año⁻¹ de carbono orgánico (Núñez, Ruiz, & García, 2014).

De acuerdo con Galicia et al., (2015), los patrones de cambios en el carbono orgánico del suelo y los flujos de carbono en los bosques templados de México resultan de cambios locales generados por las actividades humanas. Entre las que destacan el cambio de uso, el manejo forestal, los incendios, la regeneración y la sustitución de especies, siendo el cambio de uso de suelo el principal factor que permite explicar los flujos de carbono en estos ecosistemas.

González, (2016) realizó un estudio acerca de las emisiones de GEI en el valle de Mezquital, Hidalgo a causa del riego con aguas residuales. El valle de mezquital es un sitio que desde hace más de 100 años es regado con aguas residuales de la Ciudad México, práctica que promueve las emisiones de GEI, como el dióxido de carbono, metano y óxido nitroso. Ambas parcelas se monitorearon durante el cultivo de maíz, lo que permitió comparar las emisiones de los dos sistemas agrícolas. Las mediciones se llevaron a cabo mediante el

método de la cámara estática cerrada, los resultados muestran incremento en las emisiones de GEI en la parcela con sistema de riego residual, registrando altos picos, los cuales pueden estar asociados a la desgasificación o después de varios días de riego, cuando ya existe exceso de nitrógeno y carbono.

Por su parte Martínez-Prado, (2016) llevó a cabo el inventario estatal de emisiones de gases de efecto invernadero para el estado de Durango para el período 2005-2008. Unicamente se contabilizó al CO₂, CH₄ y N₂O en el cálculo, por ser los tres GEI directos más importantes. Para el cálculo se utilizaron las directrices del IPCC y se obtuvo en la categoría de Agricultura un total de 2,664.90 Gg de CO₂e y en la categoría de USCUS un balance total de 272.17 Gg de CO₂e (restando de la emisión total la captura neta).

2.3. Técnicas de cuantificación de gases de efecto invernadero en suelos

El flujo de CO₂ en el suelo se puede medir con varias técnicas de cámara diferentes, las de flujo continuo y las de flujo no continuo. Según un estudio realizado para comparar las diferentes técnicas de cámara para medir el flujo de CO₂, la confiabilidad de las cámaras no estaba relacionada con el principio de medición, sin embargo, la tendencia general parece ser que las cámaras de flujo no continuo se subestimaron sistemáticamente en un 4 a 14% mientras que no se observaron diferencias significativas entre las cámaras de flujo continuo (Pumpanen et al., 2004).

Históricamente la medición de gases de efecto invernadero se lleva a cabo utilizando el método de cámara estática por diferentes periodos de tiempo. Dentro de las técnicas para la medición de emisiones provenientes del suelo, que van desde micrometeorológicas hasta modelamiento matemático, existe una técnica basada en diferentes tipos de cámaras estáticas que son el método más empleado en la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero en el suelo (Davidson et al., 2002; Xu et al., 2006). Una de las opciones más viables comercialmente hablando es Li-Cor 8100A (LICOR Biosciences, Inc., Lincon,

NE), porque ha sido reconocida por su versatilidad en el campo de la medición del flujo de CO₂ (Kostyanovsky et al., 2018).

De acuerdo con C.M. Hoover (ed.), (2008), en su libro “Mediciones de Campo para Monitoreo de Carbono Forestal”, establece que la cuantificación de la respiración del suelo a escalas de paisajes se complica, tanto por dificultades de medir con precisión la respiración del suelo en un momento y lugar específico, así como por la variabilidad espacial y temporal, debido a que la topografía y la estructura de la vegetación influyen en el microclima. Del mismo modo las condiciones climáticas también afectan la respiración del suelo, entre ellas la velocidad del viento, precipitación y temperatura que se tiene durante la medición. Aunque se han desarrollado múltiples protocolos para dichas mediciones, en este libro recomiendan utilizar cámaras cerradas ya que es un protocolo rentable, altamente portátil y genera resultados consistentes.

Por otro lado Cueva-Rodríguez, et al., (2012), reportan que la respiración del suelo está en función de la humedad y la textura del suelo, lo que hace que esta varíe espacialmente dentro de los ecosistemas, dificultando su estudio, porque se propuso diseñar un sistema portátil para determinar la variación espacial de la respiración del suelo en diferentes ecosistemas, basándose principalmente en la técnica de cámaras dinámicas cerradas, con un analizador de gases infrarrojo que monitorea el incremento de CO₂ en un periodo de tiempo establecido, donde se demostró que este sistema cuenta con la sensibilidad necesaria para detectar la variación espacial y temporal de la respiración del suelo en estudios de ecosistemas.

De acuerdo con el protocolo del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) para mediciones de flujo de gas traza en cámara, menciona varios aspectos que se deben considerar relacionados con las técnicas de cámara, como la perturbación del suelo que puede ocurrir con la instalación de la cámara, para lo que se recomienda instalar la cámara al menos 24 horas antes de las determinaciones del flujo. Perturbaciones de temperatura, las cuales pueden tener un efecto marcado en la actividad biológica que complican los

cálculos de flujo. Perturbaciones de presión, causadas por el viento, las cuales se reducen usando cámaras cerradas (Parkin, T.B. and Venterea, 2010).

2.4. Almacenamiento de carbono orgánico en suelos forestales

Un estudio realizado en Europa presenta datos del intercambio neto de carbono en los ecosistemas forestales europeos, donde confirman que muchos de estos ecosistemas actúan como sumideros de carbono, cuya absorción llega hasta las 6.6 toneladas de carbono por hectárea al año, dependiendo del tipo de bosque (Valentini et al., 2000).

A nivel mundial, el suelo almacena dos veces más carbono a comparación de la atmósfera y casi el doble que la vegetación, considerándose el segundo sumidero de carbono más importante después de los océanos, donde, por ejemplo un suelo forestal contiene más carbono que un suelo degradado (Jiménez, 2017).

Cruz-Flores et al. (1998) reportan que el promedio de carbono almacenado en los Andosoles de México coincide con lo reportado para Andosoles a nivel mundial (306 Mg ha^{-1} a 100 cm de profundidad).

Por otro lado, en el Cofre de Perote, Campos (2002) ha reportado que la concentración de carbono orgánico del suelo decrece con la altitud, ya que en las partes altas (2500 msnm) se almacenan hasta 26 g kg^{-1} , mientras que a los 1650 msnm se ha calculado que el potencial de almacenamiento de C es de 426 Mg ha^{-1} a una profundidad de 1 m en Andosoles.

Luis-Mejía, et al., (2007) calcularon la cantidad de nuevo carbono orgánico del suelo (NCOS) agregado por el establecimiento de reforestaciones con *Pinus michoacana*. El NCOS se obtuvo a partir de las diferencias en composición de isótopos ($\delta^{13}\text{C}$) del suelo y tejido vegetal. Los resultados indicaron que la tasa de acumulación de NCOS por el cambio de uso de suelo de maíz a *P. michoacana* en las profundidades 0-5 y 5-10 cm fue 0.561 y $0.115 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente.

Mientras que González-Molina, et al., (2008) desarrollaron un análisis de los factores a considerar para determinar el cambio de COS en los terrenos de laderas de la Sierra Norte de Oaxaca. Los factores que más afectaron los cambios en la cantidad de COS que se dan en el suelo fueron la densidad aparente del suelo (D_a) y la prolijidad con que fueron eliminados los residuos orgánicos de la muestra.

Peña-Ramírez et al., (2009) encontraron, bajo un régimen rústico, que los Andosoles de edades entre 8000 y 10 000 años en bosques de pino y oyamel localizados en el campo volcánico de la Sierra del Chichinuatzin tenían una acumulación de C orgánico total en el suelo de entre 370 y 540 $Mg\ ha^{-1}$, respectivamente.

Por su parte Hernández, (2009) reporta que el depósito de carbono en humedales es derivado de la productividad primaria y de la acumulación de sustancias orgánicas alóctonas, menos la descomposición de materia orgánica en el suelo. Conforme a este balance se determina si un humedal es una fuente de gases de efecto invernadero o como un depósito natural de C. El almacenamiento de C en los humedales se da tanto en la biomasa vegetal como en sus suelos. Se han estimado productividades primarias de más de 10 $Mg\ C\ ha^{-1}\ año^{-1}$ en algunos humedales naturales de las zonas tropicales.

Cruz-Flores & Etchevers-Barra, (2011) realizaron una investigación entre 2004 y 2009 en 187 sitios distribuidos en nueve áreas naturales protegidas de México con bosques templados sobre suelos desarrollados de material ígneo, sedimentario o complejos metamórficos bajo bosques de los géneros *Pinus* y *Abies*. El contenido promedio de COS fue superior a 100 $Mg\ C\ ha^{-1}$. Mientras que suelos forestales sobre rocas sedimentarias y metamórficas, tuvieron mayores contenidos de COS que los observados en suelos derivados de material piroclástico. Bajo especies del género *Pinus* hubo menos COS que bajo las del género *Abies*. Se encontró un promedio de 147 $Mg\ C\ ha^{-1}$ que fue 43.5 % mayor de COS de los suelos formados de roca sedimentaria y complejos metamórficos (de las reservas de la biosfera Sierra de Manantlán y El Cielo y de

algunos suelos de zona baja del Parque Nacional Benito Juárez) que el almacenado en los suelos derivados de roca ígnea ($83.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$) de los parques nacionales Izta–Popo, Nevado de Toluca, Zoquiapan, Volcán Ajusco y Nevado de Colima.

Vela-Correa, et al., (2012), reportan el COS para áreas boscosas, de uso agrícola y en áreas reforestadas en la Ciudad de México. En planicies con coberturas de *Quercus spp.*, el COS es de 150 Mg C ha^{-1} ; en los suelos tipo Regosol éutrico, Leptosol lítico y con cobertura de *P. montezumae*, *P. patula*, *P. ayacahuite*, el COS osciló entre $50\text{-}100 \text{ Mg C ha}^{-1}$. En suelos Phaeozems háplicos y Leptosoles, que se encuentran en las planicies aluviales intermontanas de los volcanes Tulmiac y Cuautzin los valores de COS fueron $< 50 \text{ Mg ha}^{-1}$. En lo referente al tipo de vegetación, el bosque de *A. religiosa* presentó el nivel más alto de COS con 145.6 Mg ha^{-1} , el bosque de *Quercus spp.*, con 121.3 Mg ha^{-1} y el bosque de *Pinus spp.*, con 119.4 Mg ha^{-1} . Los suelos agrícolas contienen menos de la mitad de COS que los suelos forestales.

Arteaga, et al., (2017) realizaron una estimación de almacenes de carbono bajo diferentes usos de suelo en el altiplano central de México; el trabajo se realizó a una profundidad de 20 cm. Los suelos bajo uso agrícola y pastoreo mostraron incrementos significativos en la densidad aparente, mayor acidez y disminución de la concentración de carbono, a comparación de los suelos forestales. Los almacenes de carbono orgánico para el suelo forestal, agrícola y pecuario fueron de 131, 53 y 63 Mg C ha^{-1} respectivamente. Estos resultados apuntan a que el tiempo e intensidad de manejo son concluyentes en la pérdida de los almacenes del carbono orgánico del suelo, y en la variación de algunas de sus propiedades físicas y químicas.

2.5. Literatura citada

Acosta, M., Darenova, E., Krupková, L., & Pavelka, M. (2018). Seasonal and inter-annual variability of soil CO₂ efflux in a Norway spruce forest over an eight-year study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256–257(March), 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.03.005>

- Álvarez Arteaga, G., García Fajardo, B., Orozco Hernández, M. E., Mireles Lezama, P., & Contreras Martínez, J. (2017). Estimation of carbon stocks under different soil uses in the central highlands of Mexico. *Acta Agronomica*, 66(1). <https://doi.org/10.15446/acag.v66n1.52842>
- Bond-Lamberty, B., & Thomson, A. (2010). A global database of soil respiration data. *Biogeosciences*, 7(6), 1915–1926. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1915-2010>
- C.M. Hoover (ed.). (2008). *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring*. *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8506-2>
- Covaleda, S., & Prat, C. (2009). Flujos de CO₂ edáfico en un transecto de bosques de pino-encino afectados por actividad antrópica en la microcuenca de Atécuaro (Michoacán, México), (June 2016).
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1526-4610.2009.01570.x>
- Cueva-Rodríguez, A., Yépez, E. A., Garatuza-Payán, J., Watts, C. J., & Rodríguez, J. C. (2012). Diseño y uso de un sistema portátil para medir la respiración de suelo en ecosistemas. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 327–336.
- DeFries, R. S., Houghton, R. A., Hansen, M. C., Field, C. B., Skole, D., & Townshend, J. (2002). Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(22), 14256–14261. <https://doi.org/10.1073/pnas.182560099>
- Delgado-balbuena, J., Yépez, E. A., Paz-pellat, F., Ángeles-pérez, G., Alvarado-barrientos, M. S., Arredondo, T., ... Garatuza-, J. (2018). De Carbono En Ecosistemas Terrestres Y Database of Vertical Carbon Dioxide Fluxes At Terrestrial and Coastal Ecosystems in Mexico. *ElEmEntos Para Políticas Públicas*, 2(2), 93–108.
- Galicia, L., María, A., Cáceres, G., Cram, S., Vergara, B. C., Ramírez, V. P., & Saynes, V. (2015). Stocks and Dynamics of Soil Organic Carbon in Temperate Forests of Mexico. *Terra Latinoamericana*, 35, 1–29.
- González, M. B. (2016). *Emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O asociadas al riego con agua residual en el Valle del Mezquital, Hidalgo*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hatfield, J. L., Baker, J. M., Rochette, P., & Hutchinson, G. L. (2005). Measurement of Soil Respiration in situ: Chamber Techniques. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr47.c12>
- Hernández, M. E. (2010). Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana*, 28(2), 139–147. Retrieved from

<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57316058005>

- J.C. Azevedo et al. (eds.). (2014). *Forest Landscapes and Global Change: Challenges for Research and Management*. New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0953-7_6
- Jiménez, A. S. (2017). Estimación del potencial de captura de carbono del bosque de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan. *Animal Genetics*, 39(5), 561–563.
- Kostyanovsky, K. I., Huggins, D. R., Stockle, C. O., Waldo, S., & Lamb, B. (2018). Developing a flow through chamber system for automated measurements of soil N₂O and CO₂ emissions. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 113, 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.040>
- Law, B. E., Baldocchi, D. D., & Anthoni, P. M. (1999). Below-canopy and soil CO₂ fluxes in a ponderosa pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94(3), 171–188. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00019-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00019-2)
- Martínez-Prado, M. A. (2016). Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero para el estado de Durango, México. *Revista Mexicana de Ingeniera Química*, 15(2), 575–601.
- Núñez, X. C., Ruiz, L. V., & García, C. G. (2014). Black carbon and organic carbon emissions from wildfires in Mexico. *Ciencias, Centro De Atmósfera*, 27(2), 165–172. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)71107-5](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(14)71107-5)
- Ordóñez, J. A., De Jong, B., & Masera, O. (2001). Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques*, 7(2), 27–47. <https://doi.org/10.3113/FAI.2008.0390>
- Pajares, S., & Etchevers, J. D. (2006). Emisión de CO₂ en sustratos volcánicos del estado de México y Tlaxcala, 56230.
- Parkin, T.B. and Venterea, R. T. (2010). Simplified method for quantifying theoretical underestimation of chamber-based trace gas fluxes. *Journal of Environmental Quality*, 39(1), 126–135. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0231>
- Pumpanen, J., Kolari, P., Ilvesniemi, H., Minkinen, K., Vesala, T., Niinistö, S., ... Hari, P. (2004). Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agricultural and Forest Meteorology*. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.12.001>
- Raich, J. W., & Schlesinger, W. H. (1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 44(2), 81–99. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1992.t01-1-00001.x>
- Saranya, K. R. L., Reddy, C. S., & Rao, P. V. V. P. (2016). Remote Sensing Applications: Society and Environment Estimating carbon emissions from forest fires over a decade in Simlipal Biosphere Reserve, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 4, 61–67.

<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2016.06.001>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) ;Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018). *MÉXICO Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México.

<https://doi.org/http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/117>

Valentini, R., Matteucci, G., Dolman, A. J., Schulze, E.-D., Rebmann, C., Moors, E. J., ... Jarvis, P. G. (2000). Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 404, 861. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1038/35009084>

Vela-Correa, G., López-Blanco, J., & Rodríguez-Gamiño, M. de L. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México Levels of total organic carbon in The Suelo de Conservación of the Distrito Federal , Central Mexico. *Investigaciones Geográficas: Boletín - Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México*, 77, 18–30.

CAPÍTULO 3

3. RESPIRACIÓN DEL SUELO EN UN BOSQUE TEMPLADO DEL CENTRO DE MÉXICO DURANTE INVIERNO Y PRIMAVERA

Soil respiration in a temperate forest of central Mexico over winter and spring

Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente (RCHSCFA)

Yadihra Cruz-Sánchez^{1*}, Alejandro I. Monterroso-Rivas¹, Leticia C. López-Teloxa C¹ y Diodoro Granados-Sánchez¹

¹ Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México – Texcoco km 38.5. C. P. 56230. Texcoco de Mora, Estado de México, México.

*Corresponding author: yaridd04@gmail.com, tel.:7226119480

3.1. Ideas destacadas:

- La respiración del suelo se relacionada más con la actividad microbiana y la materia orgánica.
- Se midió la respiración con una cámara de flujo continuo a una profundidad de cinco centímetros.
- En primavera se observó más flujo de emisiones comparado con invierno.
- El bosque de pino emitió más en invierno y en primavera fue el bosque de pino y oyamel.
- Los bosques son grandes sumideros de carbono al igual que importante fuente de emisiones.

3.2. Resumen

Introducción. La respiración del suelo permite conocer la actividad y emisiones de éste hacia la atmosfera.

Objetivo. Estimar la respiración del suelo en un bosque templado del centro de México a partir de cambios en el dióxido de carbono.

Métodos. Se midió la respiración con una cámara de flujo continuo LI-COR modelo LI8100A durante invierno y primavera en tres comunidades de bosque: bosque de pino, bosque de pino, oyamel y aile, así como bosque de pino y oyamel. Se buscó encontrar su relación con las coberturas vegetales, temperatura y humedad ambiental y edáfica. Finalmente, se aplicaron pruebas estadísticas para probar las diferencias entre variables y comunidades.

Resultados. La respiración del suelo varía tanto estacionalmente como entre las diferentes coberturas de bosque evaluadas. Durante el invierno la emisión de dióxido de carbono fue de 1.07 y hasta 2.10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, con un coeficiente de variación de 19.53% entre coberturas vegetales. En primavera los valores de emisión se encuentran entre 1.28 y 5.15 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ y su coeficiente de variación fue de 28.67% entre coberturas vegetales. El coeficiente de variación entre primavera e invierno es de 50.08% lo que indica diferencias significativas entre estaciones.

Conclusión. La respiración del suelo en el centro de México se relaciona con temperatura y humedad del suelo o una combinación de ambas. Hay más emisiones durante primavera que en invierno.

Palabras clave: oyamel; pino; aile; emisiones; humedad del suelo; temperatura del suelo;

Keywords: fir; pine; aile; emissions; humidity of floor; soil temperatura;

3.3. Introducción

Las tierras cubiertas de árboles, incluidas las tierras forestales, cubren aproximadamente el 28% de la superficie terrestre (Oertel, Matschullat, Zurba, Zimmermann, & Erasmi, 2016). En conjunto con la agricultura y otros usos del suelo son el segundo mayor emisor de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que representa el 24% del total de emisiones globales (Waheed, Chang, Sarwar, & Chen, 2018). Cuando se incluye la deforestación y degradación de estos para usos agrícolas, la extracción de madera y la expansión de asentamientos humanos entonces contribuyen hasta el 17% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono - CO_2 (Santini et al., 2019).

Los bosques, después de los océanos y los suelos, son considerados como mecanismos para la captura de carbono como ecosistemas y no como árboles aislados, reconociendo el hecho de que el suelo del bosque contiene alrededor de dos tercios del carbono en los ecosistemas forestales (Dixon et al., 1994).

Razón por la que son nombrados sumideros terrestres, al almacenar carbono en los ecosistemas forestales (vegetación viva, materia orgánica en descomposición y suelo) y sus productos (maderables y no maderables, combustibles fósiles no usados, etc.). Por lo tanto, los flujos o emisiones de carbono se relacionan con la degradación tanto de los ecosistemas forestales como de sus productos (Yáñez & Vargas, 2004). Las emisiones de CO₂ desde el suelo provienen de la respiración, raíces y actividad microbiana en éste, de tal manera que, la tasa de las emisiones depende de la intensidad de la respiración del suelo (Rs) (Reicosky & Saxton, 2007). Además, representa el mayor flujo de carbono (C) desde los ecosistemas terrestres a la atmósfera, en términos de la emisión total de CO₂ del suelo (Yan et al., 2019). Existen estudios que han examinado la Rs en una serie de escalas espacio-temporales, ya que este proceso desempeña un papel crítico en la regulación de la concentración atmosférica de CO₂, el equilibrio global de C y la vulnerabilidad al cambio climático (Yan et al., 2019).

La Rs está relacionada con características bióticas como el metabolismo de las plantas, la fotosíntesis y la materia orgánica (MO) presente en la capa superficial del suelo (Ryan & Law, 2005). También se relaciona con atributos abióticos como la temperatura del suelo (Ts), la humedad del suelo (Hs) y otras condiciones ambientales menores. Las altas fluctuaciones espaciales, temporales e interanuales de la Rs hacen que sea muy difícil determinar las emisiones de CO₂ en diferentes entornos. Los métodos directos, como las mediciones realizadas con apoyo de cámaras dinámicas, proporcionan información esencial sobre la Rs durante un período de tiempo definido (Yadav & Wang, 2017).

De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) en el periodo 1990-2015 las emisiones directas de GEI en México ascendieron a 700 millones de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂ e). De las anteriores, la categoría de Tierras Forestales reporta emisiones netas con magnitud negativa (-139,970.12 Gg de CO₂ [$\pm 15.78\%$]), debido a que existe absorción de CO₂, por lo que podría considerarse como un sumidero. Sin embargo, este sector está en riesgo de disminuir su capacidad de captura dados

los procesos de deforestación y degradación de suelos. Según el INEGYCEI las absorciones de CO₂ se deben principalmente a procesos de captación de la vegetación durante la fotosíntesis y las emisiones se originan por la respiración (no considerada por IPCC), la descomposición y la combustión de materia orgánica. Es decir, se incluyen en este inventario, las emisiones y absorciones de CO₂ debidas a cambios en la biomasa, en la materia orgánica muerta y en el suelo, pero no se incluye el proceso de Rs en este tipo de ecosistemas.

Por lo anterior, el propósito de este estudio fue comparar las tasas de Rs de un bosque templado en tres clases de cobertura vegetal: 1) bosque de pino (BP), 2) bosque de pino, oyamel y aile (BPOA) y 3) bosque de pino y oyamel (BPO). También se incluyó el análisis entre dos temporadas del año: primavera e invierno. Finalmente se analizó la correlación con la temperatura y la humedad edáfica con la Rs. Con lo anterior, consideramos que se tendrá información detallada sobre emisiones de CO₂ en suelos forestales que permita ser más específicos en los factores de cálculo nacionales del INEGYCEI, así como mejores prácticas de manejo y conservación forestal.

3.4. Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ) que se localiza en los municipios de Ixtapaluca y Chalco del Estado de México. Su centroide se encuentra en las coordenadas 19°15'29"N y 98°37'45"W (Chávez-Salcedo et al., 2018) y ocupa un área de 1,640 ha. Los climas dominantes son, en las partes de mayor altitud semifríos [C(E)(w₂)(w)] y circunscribiendo a éstos, el clima es templado del tipo C(w₂)(w). La precipitación media anual va de 800 hasta 1,200 mm mientras que la temperatura promedio anual va de 6°C en las zonas más altas hasta los 14°C (Lomas-Barrié, C.T.; Terrazas-Domínguez, S.; Tchikoué-Maga, 2007). La vegetación característica es de bosques templados, siendo el bosque de pino el de mayor extensión (Lomas-Barrié et al., 2007). Sin embargo, también se puede encontrar *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham,

Quercus sp. (Chávez-Salcedo et al., 2018)., *Alnus firmifolia* Fernald (aile) (Paredes-Gonzalez, Monterroso-Rivas, Rodríguez-Esparza, & Zamudio-Sánchez, 2018)., *Pinus hartwegii* Lindl. y *Pinus montezumae* Lam, principalmente (Chávez-Salcedo et al., 2018).

Bosque y cubierta vegetal estudiadas

Se analizó la Rs de tres tipos de cobertura durante invierno y primavera, ya que son los tipos más abundantes en la EFEZ y las condiciones climáticas son contrastantes en los dos periodos. En cada tipo de cobertura se seleccionó un sitio de estudio, teniendo así tres sitios estudiados:

Bosque de pino (BP). El sitio se encuentra a una altura promedio de 3283 msnm. La especie arbórea dominante es *Pinus hartwegii* Lindl., (Pino de las alturas), en el sotobosque prolifera el zacatón (*Muhlenbergia macroura* (H.B.K.) Hitchc) (Chávez-Salcedo et al., 2018), que cubren cerca del 95% de la superficie del suelo, además presenta alta regeneración natural y abundantes residuos de acículas, por lo que la cantidad de materia orgánica en descomposición, en los primeros 10 cm del suelo es abundante. Existe gran cantidad de raíces del estrato herbáceo hasta aproximadamente los 30 cm de profundidad del suelo. Los suelos en este sitio son profundos, con buen drenaje y aireación, además conservan un alto porcentaje de humedad edáfica, razón por la cual prolifera la actividad microbiana. Debido a la presencia de estratos de porte bajo, no se observan problemas de erosión.

Bosque de pino, oyamel y aile (BPOA). El sitio se caracteriza por la asociación de *Pinus hartwegii* Lindl., *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham (oyamel) y *Alnus firmifolia* Fernald (aile) (Paredes-Gonzalez, Monterroso-Rivas, Rodríguez-Esparza, & Zamudio-Sánchez, 2018). En el estrato arbustivo, la especie dominante es *Larrea spp.* (jarilla), mientras que en el estrato herbáceo dominan diferentes especies de pastos y musgo, cubriendo cerca del 80% del suelo forestal. Está ubicado a una altitud de 3305 msnm. El suelo cuenta con una gran cantidad de materia orgánica en descomposición, además debido a la alta

humedad presente se observa gran cantidad de hierbas. Son suelos profundos con gran cantidad de raíces presentes en los primeros horizontes, de color café oscuro.

Bosque pino y oyamel (BPO). Aquí se caracteriza por asociación entre *Pinus hartwegii* Lindl., y *Abies religiosa* (Kunth) Schltl. et Cham. La vegetación herbácea está dominada principalmente por musgo. Está ubicado a una altitud de 3337 msnm. Los suelos son profundos de color café oscuro, ricos en materia orgánica y muy húmedos. Dentro de los primeros 30 cm de profundidad se pueden encontrar gran cantidad de raíces de la vegetación herbácea presente.

Respiración de suelo

La R_s se midió con una cámara de flujo continuo modelo LI-8100A (LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA), que se coloca sobre un collar de PVC instalado en el suelo previamente a una profundidad de cinco centímetros aproximadamente (López, Monterroso y Gómez, 2019). El aire acumulado en el interior de la cámara es enviado a un infrarrojo donde el CO_2 se detecta y es cuantificado. Además, en la cámara se incluyen sensores que registran información de temperatura (T_s) y humedad (H_s) del suelo, modelo *Soil Temperature Probe* y *Theta Soil Moisture Probe*, respectivamente. Se instalaron los collares con 24 horas de anticipación en cada rodal medido para evitar mediciones poco certeras de la R_s (Cueva-Rodríguez, Yépez, Garatuzza-Payán, Watts, & Rodríguez, 2012).

El CO_2 atmosférico acumulado en la cámara se mide como $CO_2 \mu mol/m^2/s$ de aire seco. Todas las mediciones se tomaron a cada media hora durante 90 segundos con 30 segundos de banda muerta, una pre-purga de 60 segundos y la pos-purga de 30 segundos. Dentro de la cámara se genera una línea de concentración de CO_2 cuya pendiente se usa para calcular la tasa de respiración del suelo con base en la ecuación 1.

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

donde F_c es la tasa de flujo de CO_2 del suelo ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), V es el volumen de la cámara (cm^3), P_0 es la presión inicial (kPa), W_0 es la fracción de mol de vapor de agua inicial (mmol mol^{-1}), S es el área de la superficie del suelo (cm^2), T_0 es la temperatura inicial del aire ($^{\circ}\text{C}$) y C'/t es la tasa de cambio inicial en la fracción molar de CO_2 corregida en agua ($\mu\text{mol mol}^{-1}$).

Diseño experimental

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

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

Análisis estadísticos

Se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor y su correspondiente análisis Tukey HSD para probar las diferencias entre las variables (R_s , T_s y H_s) coberturas vegetales y temporadas del año. Además, se aplicó el “*Lilliefors* (Kolmogorov-Smirnov) *normality test*” para comprobar la normalidad de los datos,

después se procedió a aplicar la correlación de Spearman para conocer la influencia de las condiciones climáticas, la Ts y Hs sobre el comportamiento de Rs para cada una de las temporadas del año. Todos los análisis estadísticos se realizaron con un nivel de significancia de 0.05 y con el software R (versión 3.4.0).

3.5. Resultados y discusión

Variabilidad espacial y temporal de las tasas de respiración del suelo.

La Rs en el suelo de un bosque templado en la EFEZ varía tanto temporal como espacialmente entre las coberturas vegetales (Figura 2). Durante el periodo invernal (febrero) el promedio de emisiones de CO₂ fue de 1.85 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ para BP, 1.55 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ para BPOA y 1.20 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ para BPO, con un coeficiente de variación (CV) entre coberturas de 19%. En el periodo de primavera (mayo) la media de emisiones de CO₂ fue de 3.85, 2.25 y 4.34 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ para BP, BPOA y BPO respectivamente, y con un CV de 28% (Cuadro 1). Los valores de Rs exhibieron una fuerte estacionalidad, al observar en promedio 1.53 ± 0.29 y 3.47 ± 0.99 de emisión para la temporada de invierno y primavera. En este caso, el CV entre primavera e invierno fue de 50%. Los valores más altos de Rs observados en primavera se deben a la mayor disponibilidad de agua, la cual a su vez aumenta la actividad microbiana (Yan et al., 2019).

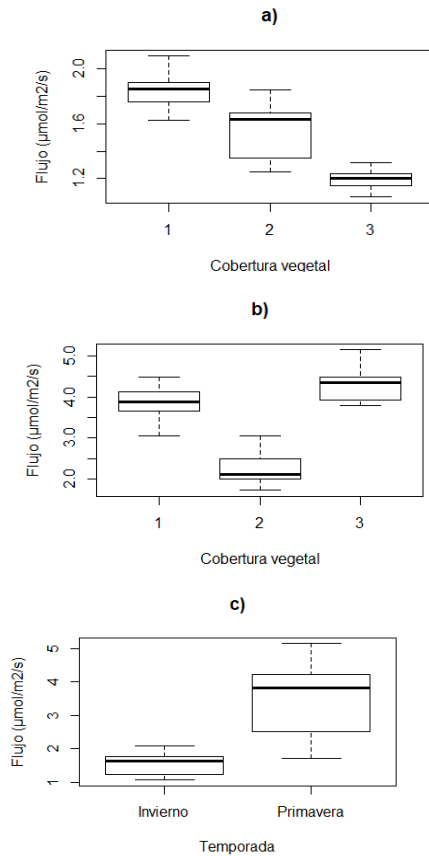


Figura 2. Diagramas de caja de variabilidad de la Rs por cobertura vegetal (1,2 y 3 en el eje X) para la temporada de invierno (a), $n = 51$, CV: 19.53%), primavera (b), $n = 39$, CV:28.67%) y por temporada del año (c), $n=90$, CV: 50.08%).

En las dos temporadas del año, la Rs fue estadísticamente diferente ($P < 0.05$) al igual que por cobertura vegetal. La temporada invernal presentó una Rs que va desde 1.07 hasta 2.10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, mientras que en primavera, los valores se encuentran entre 1.28 y 5.15 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Gao, Peng, Fan, Pei, & Bai (2018) reportaron que el flujo promedio de la Rs en la temporada invernal en ecosistemas similares osciló entre 0.32 y 0.71 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, a temperaturas debajo de los 0°C con presencia de capas de nieve de hasta 20 cm. En nuestros resultados observamos valores más elevados. Lo anterior debido principalmente a que existe una relación directa con la Ts que osciló entre los 5 y 7°C . Cueva-Rodríguez et al. (2012) encontraron que en un matorral xerófilo del estado de Sonora la Rs puede variar de 4 a 9 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ durante los periodos húmedos, mientras que en periodos secos fue menor a 0.5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Oertel et al., (2016)

mencionan que los datos promedio para climas templado durante la estación de crecimiento varían en un rango de 0.45 a 8.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

Las tasas de R_s en la temporada invernal fueron mayores para BP y menores para BPO, mientras que, en la temporada de primavera este bosque fue el que presentó mayor R_s y el BPOA la menor R_s . En la temporada de invierno la R_s ejerce un papel relativamente pequeño en la dinámica temporal en estos ecosistemas, lo que está relacionado con procesos biológicos como la fotosíntesis de las plantas, la actividad microbiana y el crecimiento de raíces y micorrizas que cambian de manera coherente con la dinámica estacional de la temperatura (Wang et al., 2013; Oertel et al., 2016).

El bosque de pino mostró valores de R_s en un rango de 1.63 a 2.10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ para la temporada invernal, mientras que para la temporada de primavera van desde 3.05 hasta 4.495 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Mientras que, en el bosque de pino, oyamel y aile fue de 1.21 a 1.85 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ hasta los 1.28 a 3.05 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ para invierno y primavera, respectivamente. Los resultados para bosque de pino y oyamel fueron de 1.07 a 1.32 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ para invierno y 3.63 a 5.15 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ para primavera. Lo que concuerda con lo reportado por Han, Shi, & Jin, (2018) durante cinco años de medición (2011-2015), donde encontraron que la R_s media anual varió de 1.40 hasta 2.44 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ y (ArchMiller & Samuelson, 2016) quienes mencionan una variación de la R_s de 1.18 a 5.94 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, ambos en ecosistemas similares al del presente estudio.

La variación en la R_s en bosques templados se puede explicar en respuesta a factores bióticos y abióticos como el tipo de vegetación, edad de las plantas, el tipo de suelo y las condiciones climáticas. La R_s consiste en respiraciones autótrofas (R_a) y respiraciones heterótrofas (R_h). Las R_a es originada a partir de las raíces y está influenciada por la temperatura del suelo y la disponibilidad de nutrientes, mientras que la R_h se origina a partir de microbios del suelo y es afectada por la materia orgánica (MO), la hojarasca, temperatura del suelo, contenido de humedad y la biomasa microbiana (Hu et al., 2018). El cambio de uso de suelo es uno de los principales factores que provocan aumentos en las

emisiones de CO₂ (Don, Schumacher, & Freibauer, 2011), esto lo demostraron Hu et al. (2018) al estudiar el aumento en las emisiones de CO₂ en la conversión de un bosque natural a plantaciones de Bambú, efecto que se debió principalmente a disminución de secuestro de carbono en el suelo.

Cuadro 1. Respiración del suelo (Rs), temperatura del suelo (Ts) y humedad del suelo (Hs) según la cobertura vegetal y época del año.

Temporada	Cobertura vegetal	Rs	Ts	Hs
		Valor medio	Valor medio	Valor medio
Invierno	BP	1.85 ± 0.13 a	6.64 ± 0.48 a	0.13 ± 0.003 b
	BPOA	1.55 ± 0.18 b	6.65 ± 0.09 a	0.11 ± 0.002 c
	BPO	1.20 ± 0.06 c	5.91 ± 0.22 b	0.21 ± 0.003 a
Primavera	BP	3.84 ± 0.43 b	10.12 ± 0.23 b	0.14 ± 0.002 c
	BPOA	2.25 ± 0.43 c	10.90 ± 1.02 a	0.23 ± 0.002 a
	BPO	4.34 ± 0.44 a	10.57 ± 0.09 ab	0.21 ± 0.003 b

Nota: Para cada variable los valores medios con diferente letra son estadísticamente significativos para la prueba de Tukey (P = 0.05).

La influencia de la vegetación es un factor importante en la variación de la Rs, aunado con la interacción del tipo de bosque y la edad (Campbell & Law, 2005; Oertel et al., 2016). Esto está vinculado a la variabilidad de la fenología de los árboles y sus características fisiológicas (Han et al., 2018). Lo anterior se ve reflejado en la cantidad de MO acumulada en la superficie del suelo, que al someterse a los aumentos de temperatura, comienza con el proceso de oxidación aumentando la Rs (Buchmann, 2000). Este mismo autor, reportó que la respiración microbiana dominó en el flujo total de CO₂ del suelo en más del 70%. Por otro lado, Gao et al. (2018) mencionan que las diferencias en las tasas de Rs son explicadas por la variabilidad en los microbios presentes en el suelo que varían de acuerdo con el tipo de vegetación presente.

Relación entre respiración, temperatura y humedad

La Ts y Hs varían significativamente con la profundidad del suelo y depende de varias características del sitio, por ejemplo, la exposición a la radiación, a la luz, a la sombra o al viento (Oertel et al., 2016). Por lo anterior, se recomienda que las mediciones de Ts y Hs se deben realizar cerca de la medición del flujo de CO₂.

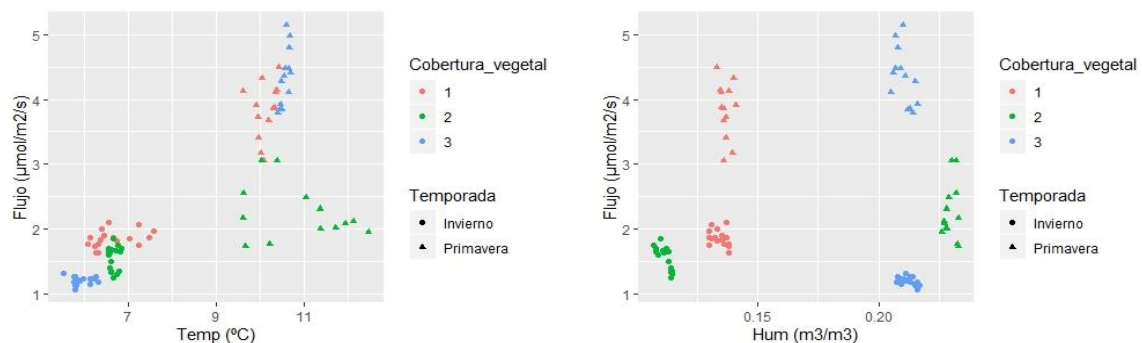


Figura 3. a) Relaciones entre la Rs y la Ts por temporada y cobertura vegetal; b) Relaciones entre la Rs y la Hs por temporada y cobertura vegetal.

Se detectaron diferencias significativas ($P < 0.05$) en Ts y Hs tanto en diferentes coberturas como entre las dos temporadas del año. En invierno la Ts registró valores medios de 6.64, 6.65 y 5.91°C para BP, BPOA y BPO respectivamente, mientras que para la temporada de primavera los valores medios fueron 10.12, 10.90 y 10.57°C para BP, BPOA y BPO respectivamente. La humedad edáfica fue menos inestable que la temperatura entre invierno y primavera donde sus valores medios oscilaron entre 0.11 y 0.21 m³/m³ (Cuadro 2). Cueva-rodríguez et al. (2012) le atribuyen la variación de la Rs al humedecimiento, este provoca la desgasificación del suelo en donde el agua va sustituyendo al aire que se encuentra en los micro y macro poros del suelo. Oertel et al. (2016) mencionan que la humedad es el parámetro de suelo más importante para las emisiones de gases del suelo. Lo que concuerda con de Araújo Santos et al. (2019), quienes mencionan que la emisión de CO₂ en cultivos agrícolas se correlacionó con la humedad del suelo y es explicado por la física del suelo, porosidad total, macroporosidad, microporosidad y la temperatura del suelo.

Los resultados muestran que la variación de la Rs se debe a los efectos de Ts y Hs, estos efectos son más notorios comparados entre las temporadas del año, es decir, se observa que mientras la Hs es estable y la Ts incrementa la Rs aumenta notoriamente. Por otro lado, al incrementar Ts y Hs, la Rs muestra ligeros aumentos (Figura 3). En otras palabras, las variaciones en Rs está dominada principalmente por la Hs, seguido de la Ts del suelo o incluso por la combinación de ambas variables.

De acuerdo con Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test se rechaza el supuesto de que los datos son normales con una $p < 0.05$. Como ya se mencionó, la Rs está controlada por la Ts y Hs, sin embargo, la prueba de correlación de Spearman muestra que para el caso de la estación primavera la correlación entre Rs y Ts es baja, a diferencia de la estación invierno donde la correlación Rs y Ts es alta (Cuadro 2). Esta prueba también muestra que las condiciones ambientales como la Ta y Ha, están altamente correlacionadas con la Rs. Esto coincide con lo encontrado por Han et al. (2018), ArchMiller & Samuelson (2016) y Wang et al. (2013) quienes observaron que la Rs en los diferentes rodales siguieron la tendencia estacional positiva de la Ts y la Rs aumentó exponencialmente con el aumento de la Ts. De acuerdo a lo reportado por Han et al. (2018), la Hs presenta un fuerte impacto en la Rs durante las sequías, lo que explica la correlación negativa entre estos dos factores para ambas temporadas, ya que no se observa gran variación estacional en los datos de Hs. La influencia de las variables climáticas sobre la Rs es alta. En este estudio el Ta y la Ha muestran una fuerte correlación con la Rs a diferencia de la Rd.

Cuadro 2. Coeficientes de correlación de Spearman para 540 valores obtenidos de 6 variables por temporada estudiada

Variable	Invierno	Primavera
	Flujo ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	
Temperatura del suelo (Ts)	0.62	-0.10
Humedad del suelo (Hs)	-0.55	-0.68
Temperatura ambiente (Ta)	0.63	-0.57
Humedad ambiental (Ha)	0.60	0.60
Radiación solar (Rd)	-0.10	-0.32

Las condiciones climáticas durante la temporada de crecimiento latente o temprana podrían determinar las tasas anuales de respiración del suelo en los ecosistemas de bosques templados (Oertel et al., 2016). Esto no sucede en los bosques tropicales húmedos, donde de acuerdo con Zahily, Nuñez, & Valleter (2017), las variables de temperatura, humedad relativa e iluminación no mantienen una relación significativa sobre la R_s .

3.6. Conclusiones

Al evaluar la respiración del suelo en tres diversos ecosistemas templados del centro de México se observó alta variabilidad estacional y espacial entre estos: en primavera se presentó mayor R_s en comparación con el invierno. En la temporada invernal el bosque de pino observó la tasa más alta de R_s y el bosque de pino y oyamel presentó la menor tasa. En primavera fue el bosque de pino y oyamel el que presentó mayor R_s mientras que el bosque de pino, oyamel y aile resultó con menor R_s . La variación de las tasas de R_s están influenciados principalmente por la combinación de temperatura y humedad del suelo además de la influencia de la temperatura y humedad ambiental. De igual manera la vegetación, raíces y microorganismos juegan un papel clave en la respiración del suelo.

3.7. 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.

3.8. References

ArchMiller, A. A., & Samuelson, L. J. (2016). Intra-annual variation of soil respiration across four heterogeneous longleaf pine forests in the southeastern United States. *Forest Ecology and Management*, 359, 370–380. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.016>

- Buchmann, N. (2000). Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands Nina, 32. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00077-8)
- Campbell, J. L., & Law, B. E. (2005). Forest soil respiration across three climatically distinct chronosequences in Oregon. *Biogeochemistry*, 73(1), 109–125. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-5165-9>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0544-y>
- Cueva-Rodríguez, A., Yépez, E. A., Garatuza-Payán, J., Watts, C. J., & Rodríguez, J. C. (2012). Diseño y uso de un sistema portátil para medir la respiración de suelo en ecosistemas. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 327–336. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57325814004>
- de Araújo Santos, G. A., Moitinho, M. R., de Oliveira Silva, B., Xavier, C. V., Teixeira, D. D. B., Corá, J. E., & Júnior, N. L. S. (2019). Effects of long-term no-tillage systems with different succession cropping strategies on the variation of soil CO₂ emission. *Science of the Total Environment*, 686, 413–424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.398>
- Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler y J. Wisniewski 1994. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science* 263: 185- 190. <http://www.jstor.org/stable/2882371>
- Don, A., Schumacher, J., & Freibauer, A. (2011). Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. *Global Change Biology*, 17(4), 1658–1670. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>

- Gao, D., Peng, B., Fan, Z., Pei, G., & Bai, E. (2018). Different winter soil respiration between two mid-temperate plantation forests. *Forest Ecology and Management*, 409(72), 390–398. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.029>
- 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(2012), 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.004>
- Hu, S., Li, Y., Chang, S. X., Li, Y., Yang, W., Fu, W., ... Lin, Z. (2018). Soil autotrophic and heterotrophic respiration respond differently to land-use change and variations in environmental factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250–251(January), 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.003>
- 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. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62911109>
- López, L., Monterroso, A. y Gomez, J. (2019). Diseño de calibración para cuantificar emisiones de CO₂ (respiración) en suelos durante intervalos horarios diurnos. Agrociencia. <https://www.colpos.mx/agrocien/agrociencia.htm>
- Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F., & Erasmi, S. (2016). Greenhouse gas emissions from soils—A review. *Chemie Der Erde - Geochemistry*, 76(3), 327–352. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
- Paredes-Gonzalez, A., Monterroso-Rivas, A. I., Rodríguez-Esparza, L. J., & Zamudio-Sánchez, F. J. (2018). Proyección y probabilidad de cambio de uso de suelo en Zoquiapan, México: consideraciones para su manejo forestal.

Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente, 24(1), 59–71.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.07.041>

Reicosky, D. C., & Saxton, K. E. (2007). Reduced Environmental Emissions and Carbon Sequestration. *No-Tillage Seeding in Conservation Agriculture 2nd Edition C*. <http://www.fao.org/3/al298e/al298e00.pdf>

Ryan, M. G., & Law, B. E. (2005). Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 73(1), 3–27. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-5167-7>

Santini, N. S., Adame, M. F., Nolan, R. H., Miquelajauregui, Y., Piñero, D., Mastretta-Yanes, A., ... Eamus, D. (2019). Storage of organic carbon in the soils of Mexican temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 446(May), 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.029>

Waheed, R., Chang, D., Sarwar, S., & Chen, W. (2018). Forest, agriculture, renewable energy, and CO₂ emission. *Journal of Cleaner Production*, 172, 4231–4238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.287>

Wang, C., Han, Y., Chen, J., Wang, X., Zhang, Q., & Bond-Lamberty, B. (2013). Seasonality of soil CO₂ efflux in a temperate forest: Biophysical effects of snowpack and spring freeze-thaw cycles. *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.008>

Yadav, D., & Wang, J. (2017). Modelling carbon dioxide emissions from agricultural soils in Canada. *Environmental Pollution*, 230, 1040–1049. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.066>

Yan, T., Song, H., Wang, Z., Teramoto, M., Wang, J., Liang, N., ... Peng, S. (2019). Sensitivity of soil respiration across multiple time scales in a temperate plantation forest, 688(5), 479–485. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.318>

Yáñez, S. A., & Vargas, M. A. (2004). La captura de carbono en bosques: ¿una

herramienta para la gestión ambiental? *Gaceta Ecológica*, 5–18.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53907001>

Serrano, E., Nuñez, M., & Valleter, E. (2017). Respiración de dióxido de carbono de suelo, en bosque tropical húmedo – Gamboa Panamá. *I+D Tecnológico*, 13(2), 49-54. Recuperado a partir de <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/1714>

CAPÍTULO 4

4. RESPIRACIÓN DEL SUELO EN ECOSISTEMAS FORESTALES TEMPLADOS DE MÉXICO Y SU RELACIÓN CON CARBONO ORGÁNICO

SOIL RESPIRATION IN TEMPERATE FOREST ECOSYSTEMS OF MEXICO AND ITS RELATIONSHIP WITH ORGANIC CARBON

MADERA Y BOSQUES

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

¹ División de Ciencias Forestales, ² Departamento de Fitotecnia y ³ Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México – Texcoco km 38.5. C. P. 56230. Texcoco de Mora, Estado de México, México.

*Corresponding author: varidd04@gmail.com

4.1. Resumen

Los ecosistemas forestales juegan un papel influyente en el ciclo global del carbono, disminuyendo el efecto invernadero a través de procesos de captura y fijación. Diversos estudios han buscado la interacción entre carbono orgánico y respiración del suelo, pero es importante aumentar la información en ecosistemas templados. Los objetivos del presente fueron analizar la variación espacial y temporal de la respiración y el carbono orgánico del suelo y evaluar la influencia de factores ambientales sobre la respiración del suelo. Se obtuvieron datos de carbono orgánico del suelo para cuatro rodales y tres profundidades diferentes mediante un analizador de carbono orgánico total. La respiración del suelo se muestreó con un sistema de cámara de medición de flujos de CO₂ del suelo en cuatro rodales y cuatro temporadas del año. Además, se tomaron datos de temperatura y humedad del suelo e información climatológica de dos estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de estudio. El carbono orgánico del suelo varió de 163.09 a 207.45 Mg ha⁻¹ almacenando más carbono en rodales de masas mixtas. La respiración del

suelo fluctuó entre 39.27 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

4.2. Abstract

Forest ecosystems play an influential role in the global carbon cycle, decreasing the greenhouse effect through capture and fixation processes. Many studies have sought 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 was to evaluate the spatial and temporal variation of soil respiration and soil organic carbon and to assess the influence of environmental factors on soil respiration. Soil organic carbon data for four stands and three different depths were obtained using a total organic carbon analyzer. Soil respiration was sampled with a flux camera system in four stands and four seasons of the year. 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 to 207.45 Mg ha⁻¹ storing more carbon in stands of mixed forests. Soil respiration fluctuated between 39.27 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

4.3. Introducción

Los ecosistemas forestales pueden absorber cantidades significativas de dióxido de carbono (CO₂). De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) para el 2015 en México la categoría Tierra del inventario (abarca Tierras forestales y Tierras de cultivos que permanecen como tales y Tierras convertidas a tierras de cultivo), que incluye suelo y vegetación, se comportó como un sumidero de GEI cuyas absorciones (emisiones negativas) alcanzaron 148 Tg CO₂, de estas las Tierras forestales que permanecen como tales por sí solas obtuvieron 138 Tg CO₂ (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT); Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2018). Estos ecosistemas juegan un papel influyente 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), de acuerdo con Anderson-Teixeira et al., (2018) almacenan aproximadamente la mitad del carbono terrestre e intercambiando anualmente con la atmósfera más de cinco veces el dióxido de carbono emitido por las actividades antropogénicas. Estos sumideros terrestres de C se refieren al carbono contenido en los ecosistemas forestales (vegetación viva, materia orgánica en descomposición y suelo) y sus productos (maderables y no maderables, combustibles fósiles no usados, etc.), de manera que los flujos o emisiones de C están dadas por la degradación de estos ecosistemas y sus productos (Yáñez Sandoval & Vargas Mena, 2004).

Dentro del balance del carbono un factor importante es la emisión desde suelo de CO₂ o respiración del suelo (Rs) (Chen, Xu, Fan, Yu, & Ding, 2017). Dentro de un sistema forestal, la Rs es la suma de la respiración heterotrófica (microbios, fauna del suelo) y autotrófica (raíz) (Hanson, Edwards, Garten, & Andrews, 2000) y la cuantificación precisa de su variación tanto diurna como estacional es crucial para una interpretación correcta de la respuesta a los factores bióticos y abióticos, así como para estimar el flujo de CO₂ anual del suelo para este tipo de ecosistemas (Brændholt, Steenberg Larsen, Ibrom, & Pilegaard, 2017).

Los cambios ambientales (factores abióticos) también causan importantes variaciones en la Rs, por lo tanto, un paso necesario para entender la Rs es identificar los factores que causan impacto potencial en los sistemas forestales y sus efectos en las tasas de emisión (Ramírez Palacio & Moreno Hurtado, 2008).

Si bien se sabe que la temperatura, la humedad y otras características del sitio regulan las tasas de Rs a escalas de parcelas dentro de ciertos biomas (Hursh et al., 2017), se sabe menos sobre los efectos de la diversidad de las plantas y la retribución del carbono edáfico sobre la Rs. Las tasas de acumulación de carbono en el suelo derivadas de los cambios de entrada de la materia orgánica en el suelo, se deberían tener en cuenta para las estimaciones de Rs globales (Adachi, Ito, Yonemura, & Takeuchi, 2017). Por lo que, las pérdidas de materia orgánica del suelo por oxidación podrían contribuir al aumento de CO₂ atmosférico y exacerbar el calentamiento global. Por otro lado, los aumentos en la materia orgánica del suelo podrían retrasar el aumento del CO₂ 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 sus impactos en la respiración y exudación de la raíz, así como 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 altamente correlacionada con COS y R_s (Xu & Shang, 2016).

Estudios han combinado variables como carbono orgánico y respiración del suelo con el fin de encontrar el papel de estos en diferentes coberturas vegetales y momentos del año. 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.

4.4. Objetivos

Los objetivos de la presente investigación fueron: a) analizar la variación espacial y temporal de la R_s y COS en cuatro diferentes condiciones de bosque templado representativo 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 R_s .

4.5. Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en un bosque templado del Estado de México, en el centro de México, perteneciente al Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl localizado dentro de la

provincia fisiográfica denominada Cordillera Neovolcánica. En 1935, los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl fueron declarados parque nacional a partir de la cota de los 3 000 msnm. Los límites del parque fueron redefinidos en 1992 a partir de los 3 600 msnm (Acosta Mireles, Carrillo Anzures, Delgado, & Velasco Bautista, 2014).

Dentro del área del parque se encuentra la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), sitio destinado a investigación y monitoreo permanente de ecosistema templado (Lomas-Barrié, Terrazas-Domínguez, & Tchikoué-Maga, 2007). El rango altitudinal va de los 3080 a 3670 msnm. El clima dominante es semifrío con verano fresco corto. La precipitación anual varía de 1000 a 1500 mm, la temporada de lluvias es de mayo a octubre, y la estación seca es de noviembre a abril. La temperatura media está en el rango de 10 a 12 °C (Paredes-Gonzalez, Monterroso-Rivas, Rodríguez-Esparza, & Zamudio-Sánchez, 2018). Los tipos dominantes de vegetación encontrados en esta área son los bosques *Pinus spp*, *Abies spp* y *Quercus spp*, mientras que el sotobosque está representado por pastos como *Muhlenbergia macroura*, *M. quadridentata* y *Festuca tolucensis* (Chávez-Salcedo et al., 2018).

Diseño experimental

Se eligieron cuatro rodales dentro del área y fueron geoposicionados con GPS (Garmin Etrex 10). El principal distintivo fue el tipo de vegetación presente en cada uno de ellos: 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*, *Abies religiosa* (BPA) (Cruz-Sánchez, Monterroso-Rivas, & López-Teloxa, 2020).

Se tomaron datos interanuales durante el año 2019 y 2020. Se tomaron un total de 36 muestras de suelo para determinar la variabilidad natural espacial del COS, es decir, 12 repeticiones de suelo a 3 diferentes profundidades dentro de cada rodal. Mientras que para la Rs se consideró la variabilidad espacial y temporal, la información se tomó durante 8 horas en cada rodal (4 días), esto en cada temporada del año: Primavera (finales de mayo), verano (finales de agosto), otoño (principios de noviembre) e invierno (finales de enero).

Carbono orgánico almacenado en el suelo en una capa de 10 cm

Para determinar el COS se siguió la metodología de Etchevers et al., (2005), la cual consiste en toma de muestras inalteradas a tres profundidades, 0-10, 10-20 y 20-30 cm con una barrena compuesta por dos anillos de diámetro 5.3 cm y una altura de 2.9 cm, por lo que el volumen de suelo calculado por cada anillo es de 63.98 cm^3 . Las muestras se secaron a temperatura ambiente y se pasaron por un tamiz con malla de 100 mm. Para obtener la 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-V, Shimadzu Labs) equipado con un módulo de muestras sólidas (modelo SSM-5000, Shimadzu Labs). El COS almacenado en las tres profundidades (espesor de 10 cm en cada intervalo de profundidad) fue calculado utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Pss = Dap (Mg\ m^{-3}) * 1000\ m^3 \quad (1)$$

$$COS (Mg\ ha^{-1}) = (CO\ (\%) * Pss)/100 \quad (2)$$

Donde Pss es el peso del suelo seco ($Mg\ ha^{-1}$), Dap es la densidad aparente del suelo ($Mg\ m^{-3}$) y CO es el porcentaje de carbono orgánico en las muestras.

Respiración del suelo y variables ambientales

La Rs del suelo se obtuvo mediante un sistema de cámara cerrada equipada con un analizador de gases infrarrojo (IRGA) y una cámara de medición de flujos de CO_2 del suelo modelo LI-COR 8100A (LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA). En cada rodal se estableció un anillo de PVC a una profundidad de 5 cm y con el fin de disminuir la perturbación del suelo, estos se establecieron 24 horas antes de cada medición. La toma de datos se realizó desde las 09:00 hasta las 17:00 horas, con dos repeticiones cada media hora durante 90 segundos con 30 segundos de banda muerta, una pre-purga de 60 segundos y la pos-purga de 30 segundos. Lo anterior para prevenir el error de flujo y acumulación de CO_2 que se acumula dentro de la cámara durante la medición (López-Teloxa, Monterroso-Rivas, & Gómez-Díaz, 2020).

Paralelamente a cada medición de Rs se registró 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 *Soil Temperature Probe* y *Theta Soil Moisture Probe*, respectivamente. Además, se obtuvo información de dos estaciones meteorológicas automáticas de la marca Davis

Instruments modelo *Vantage Pro2 Plus* 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 entre estas y 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 al 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, Ts, Hs y factores ambientales (Ta, Hr, Vv y R) se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA). El índice de correlación de Pearson se utilizó para probar la interacción entre Ts, Hs y las variables ambientales (Ta, Hr, Vv y R) con la Rs. Todos los análisis se hicieron con el software SAS (*Statistical Analysis System*) versión 9.4.

4.6. Resultados

Carbono orgánico y respiración del suelo

En el “Cuadro 3” 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 cm) almacena la más alta concentración de COS (Figura 4). Similar a lo reportado por Solís Hernández, Luna Nájera, Méndez González, Vargas Larreta, & Álvarez Gallegos, (2014) donde obtuvieron diferencias significativas con valores de COS de $174.28 \text{ Mg ha}^{-1}$ 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.

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 el “Cuadro 3”.

La R_s para las cuatro estaciones del año fluctúa de 9.08 a $29.51 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para BA, de 15.81 a $27.34 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para BP, de 8.46 a $17.50 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para BPAA y de 4.83 a $18.85 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ 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 (Figura 5). Sin embargo Campos C., (2014) reporta valores de 0.54 a $2.15 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ 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).

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 (Figura 6). Sin embargo Cueva, Robles Zazueta, Garatuza Payan, & Yépez, (2016) menciona que varios de los estudios en ecosistemas forestales de México abordan efectos de los cambios en el uso de suelo donde la Rs aumenta mientras el COS disminuye, efecto que se revierte en ecosistemas forestales conservados al actuar como grandes sumideros de carbono.

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

A lo largo del periodo de muestreo las temperaturas medias del suelo (T_s) mostraron 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. 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 a 0.43 $m^3 m^{-3}$. Los valores más altos de H_s se reportaron en verano y el mínimo en primavera, como se presenta en el “Cuadro 4”

Por otro lado, las variables ambientales (T_a , H_r , V_v y R) presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) de acuerdo con la temporada del año a excepción de la radiación solar que 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 (Cuadro 4).

Las variables ambientales y del suelo tienen influencia en la Rs, de acuerdo con el análisis de correlación de Pearson (Cuadro 5). Cabe resaltar que la temporada del año influye en las correlaciones. Durante el verano, la Rs está influenciada principalmente por Ts y Hs. Mientras que en primavera e invierno la Ta y Hr causan mayor efecto sobre la Rs. La Vv 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 Rs y todas las condiciones climáticas del sitio y del suelo analizadas (Cuadro 5). Diversos estudios mencionan que la Rs está influenciada directamente por las estaciones del año y sus particularidades en el clima, principalmente la Ts y el contenido de agua en el suelo (Jeong, Eom, Park, Chun, & Lee, 2018; Rayment & Jarvis, 2000; Melillo et al., 2017; Hicks Pries, Castanha, Porras, Phillips, & Torn, 2018)

4.7. Discusión

Almacén de carbono orgánico del suelo

El contenido de carbono orgánico almacenado en suelo tiene diferencias significativas tanto espacialmente (BA, BP, BPAA y BPA), como entre profundidades del suelo (0-10, 10-20 y 20-30 cm) ($P < 0,05$) en este estudio. Lo anterior dada la interacción de procesos geomórficos y bióticos, la variabilidad espacial del COS, la profundidad del suelo o la densidad aparente (González-Molina, Etchevers-Barra, & 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 dentro del rango mencionado por Peña-Ramírez et al., (2009) citado por Galicia et al., (2016) para bosques del campo volcánico de la Sierra del Chichinuatzin (Faja Volcánica Trans Mexicana), donde se reporta una acumulación de carbono orgánico total en el Solum

de entre 370 y 540 Mg ha⁻¹. Así mismo en la reserva de la Mariposa Monarca, Pérez-Ramírez, Ramírez, Jaramillo-López, & Bautista, (2013) reportan el contenido de COS de los 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 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 obtienen Cruz-Flores & Etchevers-Barra, (2011) en las reservas de los suelos forestales de la biosfera El Cielo y Sierra de Manantlán al norte de México 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 & Etchevers-Barra, 2011; Galicia et al., 2016).

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 (Galicia et al., 2016).

El rodal BPAA de la zona estudiada presenta grandes espacios abiertos, mismos que permite que grandes cantidades de luz lleguen al sotobosque y generen capas frondosas de especies herbáceas y arbustivas (Galicia et al., 2016). Además, debido a los aportes de carbono a través de la hojarasca del *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), reflejó los valores más elevados de COS.

Se encontraron diferencias significativas ($P < 0,05$) entre las profundidades analizadas en esta investigación, mismo que se ha reportado en otros estudios González-Molina et al., (2008) y Solís Hernández et al., (2014). Las variaciones de COS en las diferentes profundidades esta atribuida 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). Aunado a esto, diferentes autores concuerdan que el COS presenta una correlación negativa con densidad aparente, es decir, a medida que incrementa COS, DAP disminuye, tendencia que se encontró en este estudio en la primera capa del suelo (0-10 cm), esto concuerda con Hoover, (2011) en un estudio en ecosistemas similares.

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, química del suelo y microclima del suelo (temperatura y humedad), y por lo tanto pueden afectar la variabilidad en la Rs (Moyes & 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.

Los resultados de la investigación muestran que la Rs es altamente variable ya sea espacial o temporalmente. Existen diferencias significativas entre rodales y temporadas 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 del año. 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, & 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, & Navarro, 2012).

En gran medida la tasa de R_s espacial está influenciada por las comunidades vegetales que integran cada rodal, los resultados se asemeja a lo encontrado por Ramírez Palacio & Moreno Hurtado, (2008) en ecosistemas tropicales en los Andes. Los valores diarios de este estudio oscilan en un rango de 4.83 a 29.51 g CO₂ m⁻² día⁻¹ y la respiración anual fue de 52.67 Mg ha⁻¹ año⁻¹, en el bosque tropical citado son de 11.56 a 24.32 y 9.09 a 23.26 g CO₂ m⁻² día⁻¹ y la respiración anual fue de 58.35 y 51.45 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para bosques primarios y secundarios respectivamente.

Así mismo el flujo de salida de carbono anual total del suelo en un bosque boreal Canadiense se estimó en 8.96 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ (Rayment & Jarvis, 2000). En el bosque de Harvard en Petersham, Massachusett, en Estados Unidos se encontró que entre cinco tipos diferentes de vegetación analizados (Deciduous, Hemlock, Mixed, Red pine, Wetlands) la respiración anual del suelo varió de 4.69 a 9.51 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Giasson et al., 2013). Por otro lado, en seis tipos de bosques templados de China, alerce, pino, madera dura, roble, caducifolio mixto y abedul-álamo, los resultados obtenidos en promediaron 4.03, 5.14, 7.81, 7.85, 7.86 y 8.13 Mg ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente (Yang & Wang, 2006). En Corea,

Jeong et al., (2018) realizaron un estudio en un bosque templado caducifolio compuesto predominantemente por *Quercus serrata*, *Carpinus laxiflora* y *Carpinus cordata* donde se estimó que las Rs anuales para el año 2015 y 2016 eran aproximadamente de 224.5 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ y 251.3 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ (19.40 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y 21.71 Mg ha⁻¹ año⁻¹) respectivamente. Las variaciones mencionadas anteriormente pueden estar dadas por diferencias entre climas, cobertura vegetal y al tipo de medición de Rs principalmente, de cada sitio estudiado.

Estacionalmente la Rs aumentó en primavera, cuando la temperatura del suelo era más alta y la humedad del suelo era más baja, a verano, con condiciones no limitantes del agua del suelo, para BA y BP esto concuerda con Campos C., (2014) en un bosque de coníferas de Veracruz, México. Mientras que la baja temperatura de invierno coincidió con bajas tasas de Rs, similar a lo reportado por Barba, Lloret, Poyatos, Molowny-Horas, & 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 Rs durante la temporada de otoño, lo que puede asociarse a que los cambios fenológicos de la planta también contribuyan a la cantidad de biomasa disponible para la descomposición y la respiración. Lo anterior coincide con lo reportado por Giasson et al., (2013), quienes encontraron que el aumento de entradas de materia orgánica al suelo causó un aumento en las emisiones de CO₂ del suelo. Los abundantes aportes de la hojarasca en otoño pueden proporcionar más materia orgánica al suelo para alimentar la respiración heterotrófica.

Así mismo Covalada et al., (2009); Galicia et al., (2016); Costa, Landim de Souza, Lima Marrocos, Lobão, & Lopes da Silva, (2018) mencionan que los valores más bajos de Rs

se presentan en el periodo seco y los más altos coinciden con la estación lluviosa, el mismo comportamiento se presenta en el presente estudio donde la temporada seca, invierno y primavera emitieron en promedio $847.2 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ estación}^{-1}$ con una humedad del suelo (Hs) de 0.23 m m^{-3} y $1092.9 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ estación}^{-1}$ y 0.18 m m^{-3} de Hs respectivamente, mientras que en la época más húmeda, el verano emitió $1755.3 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ estación}^{-1}$ con 0.43 m m^{-3} de Hs y el otoño $1572 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ estación}^{-1}$ con una Hs de 0.33 m m^{-3} . La rehumectación de suelos secos está asociada a un aumento de la actividad microbiana y la mineralización, manifestándose como un aumento en las emisiones de CO_2 edáficas, conocido como el efecto “Birch” (Barnard, Blazewicz, & Firestone, 2020; Unger, Máguas, Pereira, David, & Werner, 2010). Kittredge, Cannone, Funk, & Chapman, (2018) mencionan que durante la temporada de crecimiento (verano) la respiración de las raíces son más altas lo que aumenta las tasas de Rs. Del mismo modo la elevada humedad (Hs y Hr) en verano y otoño, contribuyó al aumento estacional de la actividad microbiana y la producción de enzimas y por consecuente 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 las tasas 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 al registrar una disminución del COS puede estar asociada a un incremento significativo de los flujos de CO₂. igualmente Wang, Yang, & Zhang, (2006) menciona 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 demuestra Drake et al., (2018) y Acosta, Darenova, Krupková, & Pavelka, (2018), quienes mencionan que la tasa de flujo de CO₂ 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 CO₂

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 tiende 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; Galicia et al., 2016; Giasson et al., 2013)

Las variaciones estacionales registradas en las épocas mas húmedas donde la Rs es mayor se debe que al haber mayor humedad y temperaturas más elevadas en el suelo se traduce en una mayor actividad biológica y por lo tanto una mayor Rs (Covaleda et al., 2009; Ramírez Palacio & Moreno Hurtado, 2008). Nuestros datos sugieren que mientras la Ts sea mas elevada (Primavera y verano) la correlación Ts-Rs es 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 Rs más altas en primavera e invierno se dieron para Ta y Hr. Los valores muestran una correlación negativa con Ta (-0.58 y -0.54 para primavera e invierno respectivamente). Igualmente, la Vv y R presentan una correlación negativa durante el invierno, -0.65 y -0.63 respectivamente. Caso contrario para Hr donde la correlación con Rs es positiva (0.64 y 0.59 para primavera e invierno respectivamente). Se considera en este estudio que la Rs fue influenciada por un complejo conjunto de condiciones ambientales, esto debido a que las condiciones climáticas son conductores de variabilidad estacional en la Rs, como lo establecido por Acosta et al., (2018) para ecosistemas forestales similares.

4.8. Conclusiones

En los suelos del bosque conservado de Zoquiapan se almacena más COS en rodales de masas mixtas comparados con los rodales de masas puras porque existen bajo estos rodales 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 del suelo es más elevada en los rodales del género *Pinus* y *Abies* que en rodales con masas mixtas. 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, igualmente 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 a comparación del resto de las estaciones del año.

El carbono orgánico almacenado en suelos de bosques templados 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.

4.9. 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.

4.10. Referencias

- Acosta, M., Darenova, E., Krupková, L., & Pavelka, M. (2018). Seasonal and inter-annual variability of soil CO₂ efflux in a Norway spruce forest over an eight-year study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256–257(March), 93–103.
<https://doi.org/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 Izta-Popo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(26), 06–29. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322014000600002&lng=es&tlng=es
- 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, 97–104.
<https://doi.org/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, June 1). ForC: a global database of

- forest carbon stocks and fluxes. *Ecology*. Ecological Society of America.
<https://doi.org/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*, (2), 189–198.
<https://doi.org/10.3832/ifor2448-011>
- Barnard, R. L., Blazewicz, S. J., & Firestone, M. K. (2020). Rewetting of soil: revisiting the origin of soil CO₂ emissions. *Soil Biology and Biochemistry*, 107819.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107819>
- Brændholt, A., Steenberg Larsen, K., Ibrom, A., & Pilegaard, K. (2017). Overestimation of closed-chamber soil CO₂ effluxes at low atmospheric turbulence. *Biogeosciences*, 14(6), 1603–1616. <https://doi.org/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.
<https://doi.org/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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200550>

Covaleda, S., Prat, C., Garcia-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, Mejico)*. Gallardo Lancho J.F. (coord.), Campo Alves J. (ed.), Conti M.E. (ed.) *Emisiones de gases con efecto invernadero en ecosistemas iberoamericanos : Red Iberoamericana de Física y Química Ambiental*. Salamanque : SIFYQA. Retrieved from <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010049867>

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. <https://doi.org/10.1111/j.1526-4610.2009.01570.x>

Cruz-Sánchez, Y., Monterroso-Rivas, A. I., & López-Teloxa, L. C. (2020). Respiración del suelo en un bosque templado del centro de México durante invierno y primavera. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, In Review. Retrieved from <https://chapingo.mx/revistas/forestales>

- 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. Retrieved from <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra>
- 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. <https://doi.org/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*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Mexico.
- Galicia, L., Gamboa, A., Cram, S., Chávez, B., Peña, V., Saynes, V., & Christina, S. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1–29. Retrieved from <http://www.revistas-conacyt.unam.mx/terra/index.php/terra/article/viewFile/73/79>
- Giasson, M.-A., Ellison, A. M., Bowden, R. D., Crill, P. M., Davidson, E. A., Drake, J. E., ... Finzi, A. C. (2013). Soil respiration in a northeastern US temperate forest : a 22-year synthesis. *Ecosphere*, 4(11), 140. <https://doi.org/10.1890/ES13.00183.1>
- Gómez, S., Torres, V., García, Y., & Navarro, 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. Retrieved from

<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. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9592-6_6
- 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. <https://doi.org/10.1023/A:1006244819642>
- Hicks Pries, C. E., Castanha, C., Porras, R. C., Phillips, C., & Torn, M. S. (2018). *The whole-soil carbon flux in response to warming. Science* (Vol. 359). <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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). <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3591-z>
- 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. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-05342006000300010&lng=en&tlng=es
- 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. Retrieved from <https://chapingo.mx/revistas/forestales>
- López-Teloxa, L., Monterroso-Rivas, A. I., & Gómez-Díaz, J. D. (2020). Diseño de calibración para cuantificar emisiones de CO₂ (respiración) en suelos durante intervalos horarios diurnos. *Agrociencia*, p.En prensa. Retrieved from <https://www.colpos.mx/agrocien/agrociencia.htm>
- Melillo, J. M., Frey, S. D., DeAngelis, K. M., Werner, W. J., Bernard, M. J., Bowles, F. P., ... Grandy, A. S. (2017). *Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world. Science* (Vol. 358). <https://doi.org/10.1126/science.aan2874>

- 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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.07.041>
- 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*, 185–173. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.06.042>
- Ramírez Palacio, A. A., & Moreno Hurtado, F. H. (2008). Respiración microbial y de raíces en suelos de bosques tropicales primarios y secundarios (Porce, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomia Sede Medellin*, 61(1), 4381–4393. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v61n1/a14v61n1.pdf>
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00110-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00110-8)
- Schlesinger, W. H. (1995). Soil respiration and changes in soil carbon stocks. In 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.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) ; Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018). *MÉXICO Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México.
<https://doi.org/http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/117>

Solís Hernández, A., Luna Nájera, 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.
Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67435407001%0A> Cómo

Stearn, W. T. (1956). Further Information about Kunth's "Nova Genera et Species Plantarum" and "Mimoses." *Taxon*, 5(7), 153–156. <https://doi.org/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.
<https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01234.x>

Xu, M., & Shang, H. (2016, September 20). Contribution of soil respiration to the global

carbon equation. *Journal of Plant Physiology*. Elsevier GmbH.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.08.007>

Yáñez Sandoval, A., & Vargas Mena, A. (2004). La captura de carbono en bosques: ¿una herramienta para la gestión ambiental? *Gaceta Ecológica*, 70, 5–18. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53907001%0ACómo>

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

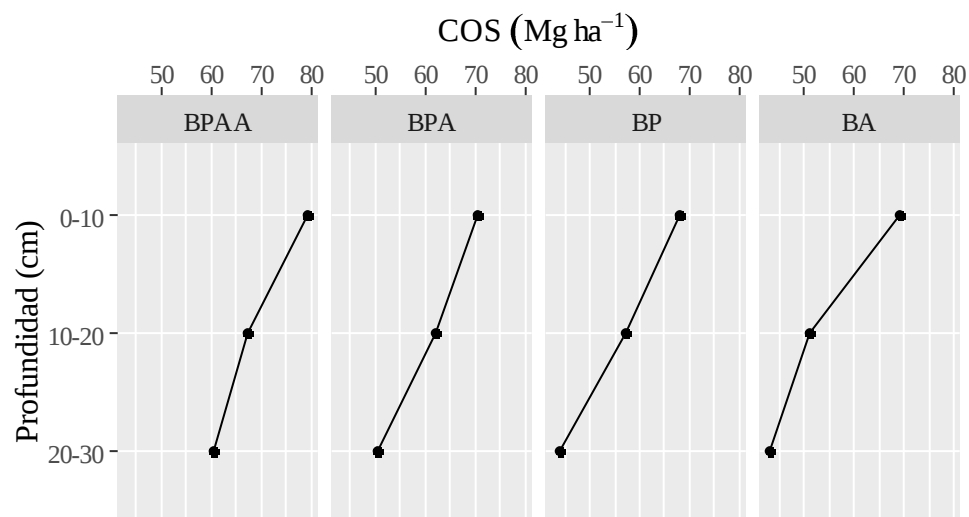


Figura 4. Variación espacial de carbono orgánico edáfico por profundidad en los sitios estudiados en el bosque templado de Zoquiapan

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*.

Cuadro 3. Carbono orgánico edáfico (COS) de horizonte de 0-30 cm, respiración anual del suelo (Rs) y condiciones del terreno de los rodales muestreados en el bosque templado de Zoquiapan (valores medios y desviación estándar)

Variable					
Rodal	COS (Mg ha ⁻¹)	Rs (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*

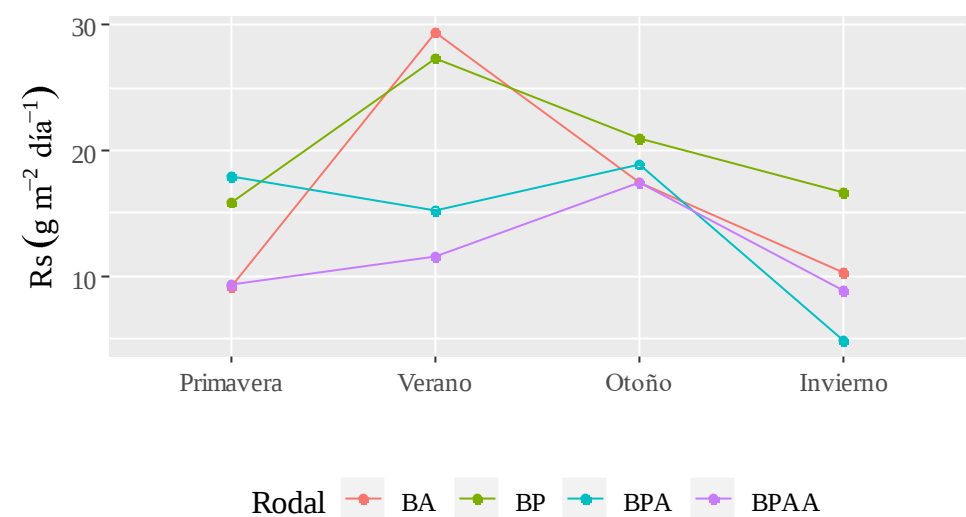


Figura 5. Variación estacional de la respiración del suelo en los sitios estudiados en el bosque templado de Zoquiapan.

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*

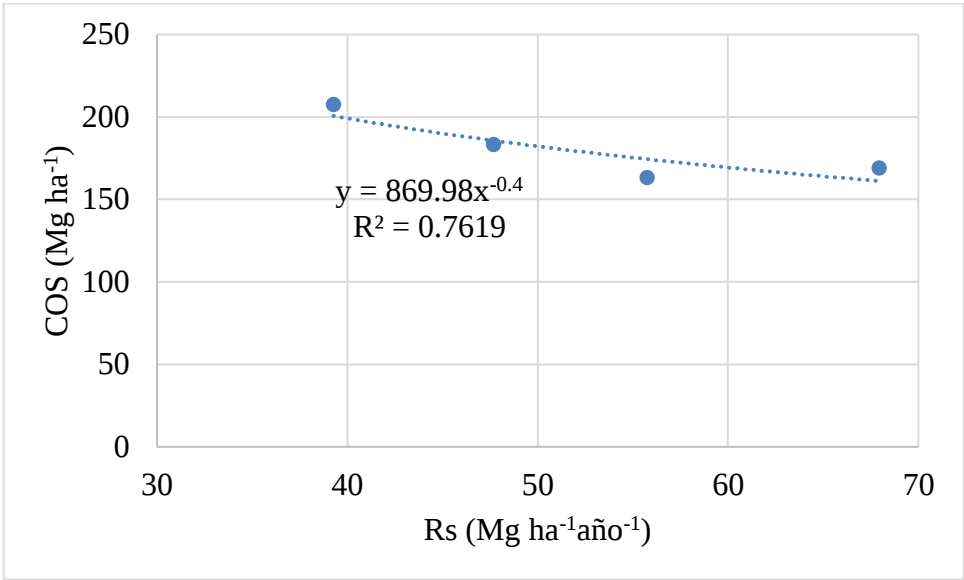


Figura 6. Relación entre la respiración y el carbono orgánico del suelo en los rodales del bosque templado.

Cuadro 4. Variables ambientales y del suelo de los rodales muestreados en el bosque templado de Zoquiapan (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: radicación solar.

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre la respiración del suelo y las variables climáticas del suelo (Zoquiapan)

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: radicación solar.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES GENERALES

Los objetivos establecidos para esta investigación (Capítulo 1) fueron cumplidos de manera exitosa cuyos resultados muestran que: los suelos del bosque conservado de Zoquiapan emiten más CO_2 edáfico en los rodales de masas puras a comparación de los rodales de masas mixtas y durante el verano se emite la mayor cantidad de este gas, mientras que, la temporada invernal muestra las menores cantidades.

Sin embargo, el almacenan de carbono orgánico edáfico es mayor en los rodales de masas mixtas y se mostró que los rodales con menores cantidades de COS estimularon la Rs y los rodales que almacenan las mayores cantidades de COS redujeron las tasas de Rs. Esto se debe a que son suelos ricos en materia orgánica y con altos contenidos de alófono, mineral que estabiliza el C y disminuye su mineralización, generando altas cantidades de materia orgánica acumulada en el suelo con tasas de descomposición baja y que se traduce en baja Rs.

La influencia positiva de los parámetros climáticos en el comportamiento del flujo de CO_2 del suelo se comprobó mediante la comparación de estas variables en las cuatro estaciones del año donde fueron examinadas.

Por otro lado, se aceptó la hipótesis de que *“Habrá más emisiones de CO_2 del suelo en coberturas vegetales densas que en masas aclaradas y se presentará mayor flujo edáfico durante la temporada de verano”*

Mientras que, se rechazó la hipótesis de que *“Habrá más carbono orgánico almacenado en coberturas vegetales densas que en masas aclaradas y a mayor contenido de COS habrá mayores emisiones de CO_2 en la superficie del suelo”* ya que los resultados mostraron una correlación negativa entre dichas variables.

Además, también se rechazó que *“La temperatura y humedad del suelo tendrán más influencia sobre las emisiones de CO₂ del suelo que las variables ambientales”* mediante la correlación de Pearson, ya que todas las variables climáticas tuvieron influencia sobre las variaciones de las emisiones de dióxido de carbono del suelo dependiendo de la temporada del año.

Para futuras investigaciones que continúen con lo que se plantea en el presente trabajo, se recomienda incorporar mediciones a largo plazo (>5 años) de Rs en diferentes ecosistemas mexicanos con el fin generar una base de datos rica a nivel país. La generación de modelos empíricos que permitan hacer estimaciones mas refinadas de los flujos de CO₂ es de vital importancia. Así mismo es indispensable estudiar la división de la Rs en sus componentes heterotróficos y autotróficos ya que son parte fundamental en la investigación del ciclo del carbono.

De igual forma se recomienda integrar diferentes almacenes de carbono y su monitoreo continuo tanto en biomasa aérea como en la materia orgánica del suelo bajo los lineamientos de IPCC.

**ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO Y
ALMACÉN DE CARBONO ORGÁNICO EN USOS DE SUELOS
FORESTALES**

CRUZ SÁNCHEZ YADHRA

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES
2020**