



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES  
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RURALES

CRECIMIENTO Y FORMACIÓN DE MADERA DE *Pinus hartwegii* Lindl. A LO  
LARGO DE UN GRADIENTE ALTITUDINAL EN EL NEVADO DE TOLUCA,  
ESTADO DE MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

PRESENTA:

LIC. EN C. A. LIZBETH CARRILLO ARIZMENDI

TUTORA ACADÉMICA:

DRA. MARLÍN PÉREZ SUÁREZ

TUTORES ADJUNTOS

DR. J. JESÚS VARGAS HERNÁNDEZ

DR. ANGEL ROLANDO ENDARA AGRAMONT

Marzo de 2018

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México.

*“ Por mucho que sopla el viento, una  
montaña nunca se arrodillará a su paso” ...*

*Walt Disney*

## Dedicatoria

*A Carmen y Jorge*

*Porque*

*siempre se preocuparon por  
no dejarme sola a lo largo de este camino.*

*A Eli*

*Gracias por tu energía  
en cada momento de mi vida.*

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el otorgamiento de la beca nacional y “beca mixta 2017 movilidad en el extranjero” ambas con número 746226 para el financiamiento de la Maestría, y por haber apoyado al proyecto de Ciencia Básica No. 219696 con el cual no podría haber realizado mis estudios de posgrado.

A CEPANAF y CONANP por las facilidades otorgadas para poder acceder al Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca para poder llevar a cabo mi trabajo de campo para mi investigación de maestría.

A la Universidad Autónoma del Estado de México y al programa de Posgrado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por las facilidades que me brindaron para poder ocupar un espacio dentro de sus instalaciones y poder llevar a cabo mi trabajo de investigación.

Al Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales por haberme brindado una calurosa estancia por dos años al igual de haberme dejado utilizar sus instalaciones, como los salones de cómputo y sus laboratorios con los cuales pude realizar la investigación de la mejor manera.

Al Instituto Nacional de Investigación Agronómica de Francia (INRA Val de Loire. Orleans, Francia) por permitirme llevar a cabo mi estancia y realizar los estudios necesarios con el fin de enriquecer en gran medida mi tesis de maestría.

A la Dra. Marlín Pérez Suárez, por la paciencia que me tuvo en este proceso de formación de maestría, por nunca dudar de mí, además de brindarme sus conocimientos y apoyo en todo momento no solo académico sino también en el aspecto personal, gracias por tantos consejos, de verdad y de corazón muchas gracias.

Al Dr. J. Jesús Vargas Hernández, por la colaboración en mi trabajo, el apoyo incondicional y las facilidades que me brindó para poder concluir este posgrado además de su tan valioso tiempo para trabajar en mi tesis en todo momento que lo solicité.

Al Dr. Ángel Rolando Endara Agramont, por brindarme sus conocimientos en campo y por el apoyo que tuvo conmigo para la realización de mi posgrado y su buena disposición, amabilidad y cordialidad siempre que tuve la oportunidad de convivir con usted.

A mis padres Carmen y Jorge, a mi hermana Eli, por la comprensión y apoyo en este camino, a mi abuelo Juan, por darme tan buenos consejos y largas charlas siempre apoyándome en mi superación profesional y personal. A mis amigos Dess, Alma, Ale, Ray, Gama, Adrián y Orlando que siempre estuvieron ahí para darme consejos y alentarme en el proceso de mi maestría, gracias de verdad, los quiero mucho.

A Farid y a la Dra. Gris con quienes compartí un espacio en el ICAR, y que de igual forma estuvieron apoyándome en todo momento, además a mis compañeros en especial a Lau y Guido, mis mejores amigos de maestría.

GRACIAS A TODOS.

## ÍNDICE

SUMMARY.....	7
RESUMEN.....	9
I. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	11
II. MARCO TEÓRICO.....	15
II.1. Cambio climático.....	15
II.2. Bosques como almacenes de carbono.....	17
II.3. Impacto del cambio climático en las especies de alta montaña.....	19
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	21
IV. JUSTIFICACIÓN.....	22
V. HIPÓTESIS.....	23
VI. OBJETIVOS.....	24
VII. MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
VII.1. Sitio de muestreo.....	25
VII.2. Especie de estudio.....	25
VII.3. Diseño de muestreo.....	26
VIII. RESULTADOS.....	29
VIII.1. Climate control on tree growth of <i>Pinus hartwegii</i> along an altitudinal gradient (3400-4000 m) at Central Mexico.....	30
VIII.2. Soil organic carbon stocks in <i>Pinus hartwegii</i> Lindl., along an altitudinal gradient from 3400 to 4000 m at Central Mexico.....	46
IX. DISCUSIÓN GENERAL.....	68
X. CONCLUSIONES GENERALES.....	71
XI. Referencias.....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Incremento de CO <sub>2</sub> de 2014 a 2018.....	<b>16</b>
<b>Figura 2.</b> Escenarios del cambio climático y sus conjuntos ante el calentamiento global.....	<b>17</b>
<b>Figura 3.</b> Principales formaciones celulares de plantas gimnospermas.....	<b>20</b>
<b>Figura 4.</b> Establecimiento sobre el gradiente altitudinal y representación de los cuadrantes para el muestreo de suelo bajo árboles de <i>P. hartwegii</i> en el Nevado de Toluca.....	<b>26</b>
<b>Figura 5.</b> Extracción de núcleos de <i>P. hartwegii</i> .....	<b>27</b>
<b>Figura 6.</b> Muestreo de núcleos de suelo bajo arboles de <i>P. hartwegii</i> en el Nevado de Toluca. ....	<b>28</b>

## SUMMARY

Climate change is responsible for serious economic and ecological impacts worldwide, becoming the main environmental problem of the 21st century. Due to the synchronicity between increases in the atmospheric concentration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), the average annual temperature and that CO<sub>2</sub> is the main substrate for photosynthesis, the main process responsible to produce biomass and plant growth, the C capture through tree growth is a key function of the ecosystems that supports climate change mitigation strategies. In addition to this, the production of ~~aerial~~ biomass is in turn the only entry of organic C to soils (COS) where the amount of C stored and the time it can remain there exceeds any of the other reservoirs. However, given that the C stored in the forests is the result of the net balance between inputs (biomass production) and outputs (decomposition of soil organic matter) of the ecosystem, climate change directly influences the capacity of the forests ecosystem to store C. In order to evaluate the response of *Pinus hartwegii* Lindl., the highest elevation-growing pine recorded in the world (4 200 m), to the climatic variability and its potential impact on the C sequestration of these forests, in the present work the radial growth and annual-ring biomass production of *P. hartwegii* was determined during the last 52 years along an altitudinal gradient, together with the evaluation of the impact of altitude on the COS warehouses. This investigation was carried out in the Area of Protection of Flora and Fauna Nevado de Toluca, through an altitudinal gradient of 600 m (3 400 m to 4 000 m), with 100 m intervals between each altitudinal floor. At each site a stratified random sampling was done, selecting 20 trees to which growth nuclei were extracted. These nuclei were analyzed in terms of the amplitude of their annual growth rings and wood density, through the combination of dendrochronology and X-ray densitometry; in addition to the annual-ring biomass produced during the last 52 years. The radial biomass production was calculated for each year based on the amplitude and average density of the growth rings for the same period. Thus, the ring width, the ring density and annual-ring biomass were related to the climatic variables of the two weatherstations closest to the study area, one at 4 139 m altitude (Nevado de Toluca Station, NT) and another at 2 560 m (Tenango del Valle, TV). The existing COS in relation to the surface (Mg C h<sup>-1</sup>) was determined by oxidation reduction for each altitudinal floor; as well as its relationship with edaphological variables (soil organic matter, pH, texture, and bulk density) along the altitudinal gradient. The results showed that there is no defined altitudinal pattern of ring width, average density and biomass; which showed maximum and minimum values of: 3.3 mm (3 900 m) and 1.8 mm (3 800 m); 0.5 g



cm<sup>-3</sup> (3 500 m) and 0.4 g cm<sup>-3</sup> (3 400 m); 6.40 g cm<sup>-1</sup> g (3 500 m) and 2.26 g cm<sup>-1</sup> g (3 400 m), for the amplitude, average density, and biomass of the growth rings. Regarding the impact of climatic variables on growth, this varied with the growing season. However, the aridity index was a factor that significantly influenced the amplitude of the ring and its density in both seasons; and only on TV about biomass. As for the COS stocks, these were significantly higher as the altitude increased, with higher (173.1 Mg C ha<sup>-1</sup> ± 5.16 Mg C ha<sup>-1</sup>) averages at 4 000 m altitude and lower (145.9 C ha<sup>-1</sup> ± 5.06 C ha<sup>-1</sup>) at 3 400 m. The results suggest that the temperature increases by themselves did not influence the growth of *P. hartwegii*, but the interaction between temperature and precipitation. However, temperature is a factor that could influence the size of the reservoirs of COS, so it is important to delve more deeply into the mechanisms that control the incorporation and permanence of organic C in the soil organic matter. The results of this work contribute greatly to the understanding of the influence of climatic variables on the capture and storage of air and ground C in the high mountain forests of *P. hartwegii*, as well as on the potential impact of climate change on forests as reservoirs of C and mitigatory of global climate change.

## RESUMEN

El cambio climático es considerado como el responsable de graves impactos económicos y ecológicos a nivel mundial, convirtiéndose en el principal problema ambiental del siglo XXI. Debido a la sincronía entre los incrementos de la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y de la temperatura media anual, y a que el CO<sub>2</sub> es un sustrato imprescindible para la fotosíntesis, principal proceso encargado de la producción de biomasa y crecimiento vegetal, la captura de C a través del crecimiento arbóreo es una función clave de los ecosistemas que soporta las estrategias de mitigación del cambio climático. Aunado a esto, la producción de biomasa aérea es a su vez la única entrada de C orgánico a los suelos (COS) donde la cantidad de C almacenado y el tiempo en el que puede permanecer ahí supera a cualquiera de los otros reservorios. Sin embargo, el C almacenado en los bosques es el resultado del balance neto entre las entradas (producción de biomasa) y salidas (descomposición de la materia orgánica del suelo) de C del ecosistema, por lo que el cambio climático influye directamente en la capacidad de los bosques para almacenar C. Con la finalidad de evaluar la respuesta de *Pinus hartwegii* Lindl., el pino registrado a mayor altitud en el mundo (4 200 m), a la variabilidad climática y su impacto potencial sobre el secuestro de C de estos bosques, en el presente trabajo se determinó el crecimiento radial y producción de biomasa de *P. hartwegii* durante los últimos 52 años a lo largo de un gradiente altitudinal, aunado a la evaluación del impacto de la altitud sobre los almacenes de COS. El trabajo de investigación se llevó a cabo en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, en un gradiente altitudinal del 600 m (3 400 m a 4 000 m), con rangos de altitud de 100 m entre cada piso altitudinal. En cada sitio se realizó un muestreo aleatorio estratificado, seleccionando 20 árboles a lo que se les extrajeron núcleos de crecimiento. Estos núcleos fueron analizados en cuanto a la amplitud de sus anillos de crecimiento y su densidad promedio, mediante la combinación de dendrocronología y densitometría de rayos X; además de la biomasa radial producida anualmente durante los últimos 52 años. La producción de biomasa radial fue calculada para cada año con base en la amplitud y densidad promedio de los anillos de crecimiento para el mismo periodo de tiempo. Así, la amplitud del anillo, la densidad promedio de estos y su biomasa fueron relacionadas con las variables climáticas de las dos estaciones de crecimiento más cercanas a la zona de estudio, una a 4 139 m de altitud (Estación Nevado de Toluca; NT) y otra a 2 560 m (Tenango del Valle; TV). El COS existente en relación con la superficie (Mg C h<sup>-1</sup>) fue determinado mediante oxidación reducción para cada piso

altitudinal; así como su relación con variables edafológicas (materia orgánica del suelo, pH, textura, y densidad aparente) a lo largo del gradiente altitudinal. Los resultados mostraron que no existe un patrón altitudinal definido de la amplitud del anillo, densidad promedio y biomasa de los anillos de crecimiento; los cuales mostraron valores máximos y mínimos de: 3.3 mm (3 900 m) y 1.8 mm (3 800 m); 0.5 g cm<sup>-3</sup> (3 500 m) y 0.4 g cm<sup>-3</sup> (3 400 m); 6.40 g cm<sup>-1</sup> (3 500 m) y 2.26 g cm<sup>-1</sup> (3 400 m) En cuanto al impacto de las variables climáticas sobre el crecimiento, este varió con la estación de crecimiento. Sin embargo, el índice de aridez fue un factor que influyó de manera significativa en la amplitud del anillo y su densidad en ambas estaciones; y sólo en TV sobre la biomasa. En cuanto a los reservorios de COS, estos fueron significativamente mayores conforme se incrementó la altitud, con mayores (173.1 Mg C ha<sup>-1</sup> ± 5.16 Mg C ha<sup>-1</sup>) promedios a los 4 000 m de altitud y los menores (145.9 Mg C ha<sup>-1</sup> ± 5.06 Mg C ha<sup>-1</sup>) a los 3 400 m. Los resultados sugieren que los incrementos de temperatura por si mismos no influenciara el crecimiento de *P. hartwegii*, pero si la interacción entre temperatura y precipitación. No obstante, la temperatura si es un factor que podría influir sobre la dimensión de los reservorios de COS, por lo que es importante ahondar más en los mecanismos que controlan la incorporación y permanencia de C orgánico en la materia orgánica del suelo. Los resultados de este trabajo contribuyen en gran medida al entendimiento de la influencia de las variables climáticas sobre la captura y almacén de C aéreo y subterráneo en los bosques de alta montaña de *P. hartwegii*, así como en el impacto potencial del cambio climático sobre los bosques como reservorios de C y mitigadores del cambio climático global.

## I. INTRODUCCIÓN GENERAL

Los sistemas forestales cubren más de  $4.1 \times 10^9$  hectáreas de la superficie terrestre. A nivel mundial, la vegetación forestal y los suelos contienen aproximadamente 1 146 petagramos de carbono (C), con aproximadamente el 37 % de este C en bosques de latitudes bajas, el 14 % en latitudes medias y el 49 % en latitudes altas (Dixon *et al.*, 1994). A pesar de que los ecosistemas alpinos cubren un 24.3 % de la superficie terrestre mundial (Kapos *et al.*, 2000), tienen una elevada importancia en la mitigación del cambio climático, que se ha agravado debido al constante incremento de la concentración atmosférica de dióxido de C ( $\text{CO}_2$ ). El  $\text{CO}_2$  es, además de un gas efecto invernadero (GEI), el principal sustrato para la fotosíntesis, de tal manera que el incremento de este gas en la atmósfera influye sobre diversos mecanismos de retroalimentación negativa y positiva entre los ecosistemas forestales y el cambio climático (Stinziano y Way, 2014).

Dado que el crecimiento vegetal (producción de biomasa) es resultado de los carbohidratos producidos durante la fotosíntesis, un incremento en el  $\text{CO}_2$  atmosférico puede resultar en un efecto fertilizante e incrementar el crecimiento vegetal (Qian *et al.*, 2010). Por tanto, la producción de biomasa es uno de los principales mecanismos para reducir la concentración de este GEI en la atmósfera y mitigar así el cambio climático global. Adicionalmente, el incremento en la productividad vegetal redundante de manera invariable en un incremento del C que es transferido hacia el suelo a través de la producción de hojarasca. Lo anterior, incrementa los almacenes de C en el suelo, el principal reservorio terrestre de este, donde puede permanecer por periodos de tiempo más prolongados que en el resto de los reservorios (Bohra *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2016). Sin embargo, el incremento de temperatura global puede tener un impacto negativo en la dimensión de los reservorios de C a través del incremento de la respiración microbiana que resulta de la descomposición de la materia orgánica, incrementando las salidas de C- $\text{CO}_2$  (Vesterdal *et al.*, 2013; Shedayi *et al.*, 2016).

Los ecosistemas ubicados a elevadas altitudes son considerados entre los de mayor vulnerabilidad a los incrementos de temperatura global, debido a que las especies vegetales que los habitan son el resultado de largos periodos evolutivos que les permitieron adaptarse a las bajas temperaturas dominantes en dichos sitios (Jones *et al.*, 2009; Linder *et al.*, 2010). De tal manera que se predice que estas especies responderán a través de la adaptación, extinción o migración hacia mayores altitudes en busca de las condiciones idóneas para su existencia (Aitken *et al.*, 2007). Lo anterior dependerá de la especie, y de que tanto su

distribución altitudinal este controlada por la temperatura (Jobbágy y Jackson, 2000). No obstante, cualquiera que sea la vía de respuesta de una especie o un ecosistema en general, los cambios impactarán de manera significativa la capacidad de los ecosistemas para capturar y almacenar C-CO<sub>2</sub> dependiendo del balance entre las entradas (producción de biomasa) y salidas (descomposición) de C del ecosistema. Hasta ahora, en este sentido se han reportado resultados contradictorios ya que por una parte se predice que el impacto del cambio climático ya es mayor sobre el proceso de descomposición (salidas de C-CO<sub>2</sub> del suelo) que para la productividad (entradas de C-CO<sub>2</sub>); mientras que otros trabajos reportan que el incremento de la temperatura genera un incremento en el crecimiento de árboles ubicados a elevadas altitudes (Way y Sage, 2008). No obstante, lo que es claro es que la respuesta dependerá de la especie, y de las condiciones específicas de cada sitio (Körner, 2007).

Para entender y predecir la respuesta de un ecosistema forestal al cambio climático es fundamental determinar patrones de crecimiento arbóreo a lo largo de gradientes altitudinales, dada la importancia de estos últimos como potentes experimentos naturales para probar respuestas ecológicas y evolutivas de la biota a las bajas temperaturas (Körner, 2007). Así, conforme se incrementa en altitud, las temperaturas disminuyen reduciéndose las tasas de descomposición y por tanto las salidas de C-CO<sub>2</sub> del ecosistema (Ohtsuka *et al.*, 2008), aunado a la disminución en el crecimiento y producción de biomasa pasando de ecosistemas donde dominan las formas de vida arbórea a formas de vida con menores requerimientos ecológicos. Así, bajo el contexto del cambio climático, existe una gran preocupación debido a que se desconocen los impactos que el incremento de temperaturas tendrá sobre los reservorios tanto aéreos como subterráneos de C de los ecosistemas forestales alpinos, los cuales podrían convertirse en una gran fuente de CO<sub>2</sub> en lugar de un sumidero, exacerbando el cambio climático.

*P. hartwegii* Lindl., es una especie que se distribuye desde México hasta Guatemala, con un rango de distribución altitudinal desde los 2 800 m hasta los 4 200 m (Campos, 1993). Los ecosistemas dominados por esta especie son de gran importancia ecológica ya que se distribuye a una altitud donde no se ha registrado otra especie de pino, y bajo condiciones donde las formas de vida arbóreas no prosperan, de tal manera que promueve la provisión de múltiples servicios ecosistémicos (retención y formación de suelos, almacén de C, captación y purificación de agua de lluvia, etc.) que benefician tanto a comunidades que se encuentran en la montaña como al pie de ella, entre las que se ubican las zonas más pobladas de México. En adición al cambio en el uso de suelo, el calentamiento global

es un problema para estos ecosistemas alterando su salud y dinámica poblacional, como es la presencia de enclaves (árboles pequeños por arriba de su distribución altitudinal) lo cual se ha tratado de adjudicar al cambio climático, a través de su correlación con los registros locales de temperatura ambiental (Hughes, 2002).

Por otra parte, también se han llevado a cabo estudios dendrocronológicos donde se relaciona la amplitud de los anillos de crecimiento con cambios en variables ambientales como temperatura y precipitación. Sin embargo, a medida que se incrementa en altitud los individuos presentes en el ecotono del límite superior del bosque están sujetos a condiciones de estrés adicionales a los presentes en el núcleo del bosque (Viveros-Viveros *et al.*, 2009), por lo que la cronología y datación de los anillos con relación a eventos climáticos extremos se complica por la presencia de anillos falsos o no detectables a simple vista resultado del crecimiento tan lento. Más aún, determinar el año exacto de establecimiento de los individuos por arriba de su límite de distribución altitudinal y dichos eventos climáticos a través de anillos de crecimiento, podría llevar a imprecisiones importantes dado que este tipo de especies presentan un estado cespitoso al inicio de su crecimiento; es decir, una reducción o alto total en su crecimiento lo cual puede llegar a prolongarse hasta siete años (González-Rosales y Rodríguez-Trejo, 2004), dependiendo de qué tan favorables sean las condiciones ambientales.

Finalmente, si bien en México existen diversos trabajos en relación a la determinación del papel de los bosques de *P. hartwegii* en los almacenes tanto aéreos como subterráneos de C (Cruz-Flores y Etchevers-Barra, 2011; Cruz-Cruz *et al.*, 2012; Galicia *et al.*, 2016), no hay reportes de estas determinaciones en relación al gradiente de condiciones ambientales que establece el incremento en altitud, y menos aún ningún trabajo que reporte la variabilidad en el crecimiento arbóreo estimando la producción de biomasa a lo largo del tiempo. Además de que su análisis es meramente observacional o de censo y no se estudian la dinámica temporal de C. Determinar la variabilidad en el crecimiento, a través del gradiente altitudinal aunado a la medición de las existencias de COS a lo largo de dicho gradiente contribuye a la generación de información que permita conocer cuál es el futuro potencial de los bosques de *P. hartwegii* ante el cambio climático, en relación con la importancia de estos bosques como reservorios de C, como de la especie en sí misma. Con la finalidad de evaluar los posibles mecanismos de retroalimentación entre productividad y descomposición, con el clima local que permita responder las siguientes preguntas: ¿En qué medida disminuye el crecimiento radial de *P. hartwegii* a lo largo del gradiente altitudinal?, ¿Cómo cambia la biomasa y los componentes del anillo anual de crecimiento a

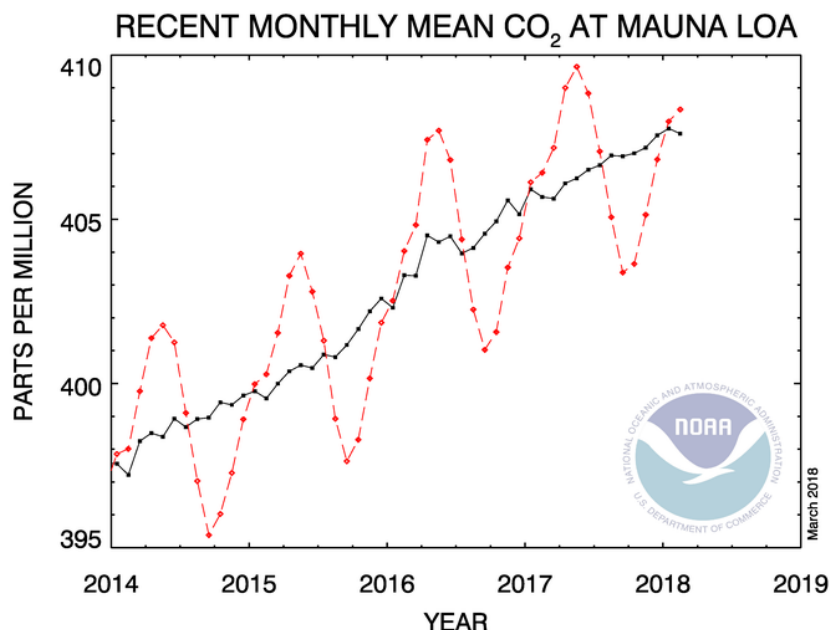
lo largo del gradiente altitudinal en los últimos 52 años (1964 a 2016)? ¿En qué medida la altitud influye sobre los almacenes de COS en los bosques de *P. hartwegii* del Nevado de Toluca?, los objetivos del presente trabajo fueron; determinar la variabilidad anual en el crecimiento radial y producción de biomasa de *P. hartwegii* a lo largo de un gradiente altitudinal durante los últimos 52 años en el Nevado de Toluca ( Resultados VIII.1); y evaluar el efecto de la altitud en la acumulación de COS bajo *P. hartwegii* a lo largo de un gradiente altitudinal de 600 m (3 000 m- 4 000 m) (Resultados VIII.2);.

## II. MARCO TEÓRICO

### II.1. Cambio climático

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), se considera al cambio climático como “Un cambio en el estado del clima que puede identificarse por cambios en la media y/o la variabilidad de sus propiedades, y que persiste por un período prolongado, típicamente décadas o más”. Además, “se refiere a cualquier cambio en el clima a lo largo del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o como resultado de la actividad humana”. Este uso difiere del de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), donde el cambio climático se atribuye directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que además de variabilidad climática natural observada durante períodos de tiempo comparables. Se ha adjudicado la problemática del cambio climático principalmente a las elevadas emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI), incluidos entre ellos el CO<sub>2</sub>, en este sentido, y con base en los datos registrados por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA), se reporta un incremento de CO<sub>2</sub> del 2014 al 2018 (Fig. 1) en donde la tendencia indica que de no haber alguna solución seguirá el aumento de este GEI para el año 2019.

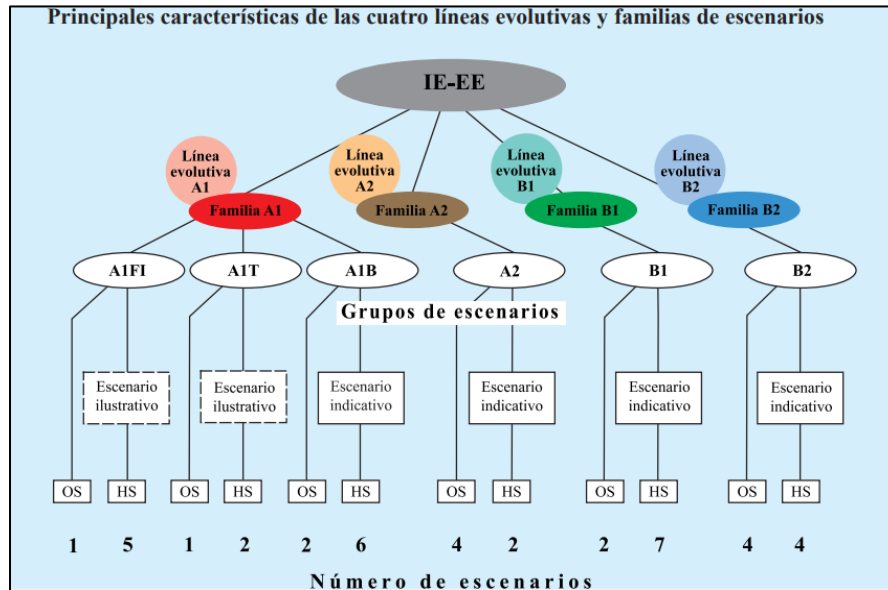




**Figura 1.** Incremento de CO<sub>2</sub> a través de 2014 a 2018, (Fuente: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html>).

Se tienen datos además de los escenarios que presenta el cambio climático (NOAA, 2017; Fig. 2) mismos que proporcionan cuatro conjuntos de escenarios denominados “familias”: A1, A2, B1 y B2. En total, seis equipos modelizadores han desarrollado 40 escenarios IE-EE. El conjunto de escenarios se compone de seis grupos tomados de las cuatro familias: un grupo de cada una de las familias A1, B1 y B2, y tres grupos de la familia A1, que caracterizan el desarrollo alternativo de tecnologías de energía: A1FI (utilización intensiva de combustibles de origen fósil), A1B (equilibrado) y A1T (predominantemente con combustibles no de origen fósil). Dentro de cada familia y grupo de escenarios, algunos de ellos comparten supuestos “armonizados” sobre la población mundial, el producto interior bruto y la energía final. Éstos están marcados con los grupos de letras “HS”, en el caso de los escenarios armonizados, y con “OS” para los escenarios que exploran las incertidumbres asociadas a las fuerzas determinantes más allá de los escenarios armonizados. Se indica también el número de escenarios desarrollados en cada categoría. Para cada uno de los seis grupos se ofrece un escenario ilustrativo (que será siempre armonizado). En el proceso abierto del IE-EE de 1998 se utilizaron cuatro proyectos de escenario indicativos, uno para cada familia; dichos escenarios se incluyen en la versión revisada del presente informe. Se incluyen también otros dos escenarios ilustrativos de los

grupos A1FI y A1T, con lo que se obtiene un total de seis escenarios ilustrativos de todos los grupos de escenarios. Todos ellos son igualmente correctos (IPCC, 2000).



**Figura 2.** Escenarios del cambio climático y sus conjuntos ante el calentamiento global, (Fuente: IPCC en línea, <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf>).

Los escenarios del IE-EE abarcan la mayor parte de los valores de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Su diversidad es similar a las de los escenarios IS92 para las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de los sectores energético e industrial, y a la de las emisiones totales, pero ocupa una gama de valores mucho mayor en lo que se refiere al cambio de uso de las tierras. Los seis grupos de escenarios abarcan unos valores de emisiones muy diversificados y parcialmente coincidentes.

## II.2. Bosques como almacenes de carbono

Los bosques son sumideros importantes de C que intercambian continuamente CO<sub>2</sub> con la atmósfera, debido tanto a los procesos naturales como a la acción humana produciendo el efecto invernadero. Comprender la participación de los bosques en el efecto invernadero requiere una mejor comprensión del ciclo del C a nivel del bosque, en este sentido, la materia orgánica contiene C susceptible de ser oxidado y devuelto a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub>. El C se encuentra en diferentes sumideros en el bosque:

- ✚ La vegetación: biomasa vegetal viva que consiste en madera y materiales no madereros. Aunque la parte expuesta de la planta es la más visible, también se debe considerar la biomasa dado que esto también incluye microorganismos. La cantidad de C en la biomasa varía entre el 35 % y el 65 % del peso seco.
- ✚ Madera muerta y hojarasca: biomasa de plantas muertas, compuesta de restos de plantas.
- ✚ Materia orgánica y humus: el humus se origina de la descomposición de la hojarasca. El C del suelo orgánico representa un grupo extremadamente importante debido a los procesos de mineralización y descomposición que se llevan a cabo ahí, así mismo por la cantidad de nutrientes necesarios para la subsistencia de las plantas.

A nivel mundial, el 19 % del C en la biosfera de la tierra se almacena en las plantas y el 81 % en el suelo. En todos los bosques (tropicales, templados y boreales), aproximadamente el 31 % del C se almacena en la biomasa y el 69 % en el suelo. En los bosques tropicales, aproximadamente el 50 % del C se almacena en la biomasa y el 50 % en el suelo (IPCC, 2000). Los productos derivados de la madera aprovechada son también importantes reservas de C secuestrado. Su longevidad depende de su uso, la vida útil puede variar desde menos de un año para la leña, hasta varias décadas o siglos para la madera. Por otro lado, la oxidación del C que se encuentra en la materia orgánica y las posteriores emisiones de CO<sub>2</sub> resultan procesos tales como la respiración de la biomasa viva, descomposición de la materia orgánica por otros organismos vivos (también llamada respiración heterotrófica) y combustión (incendios).

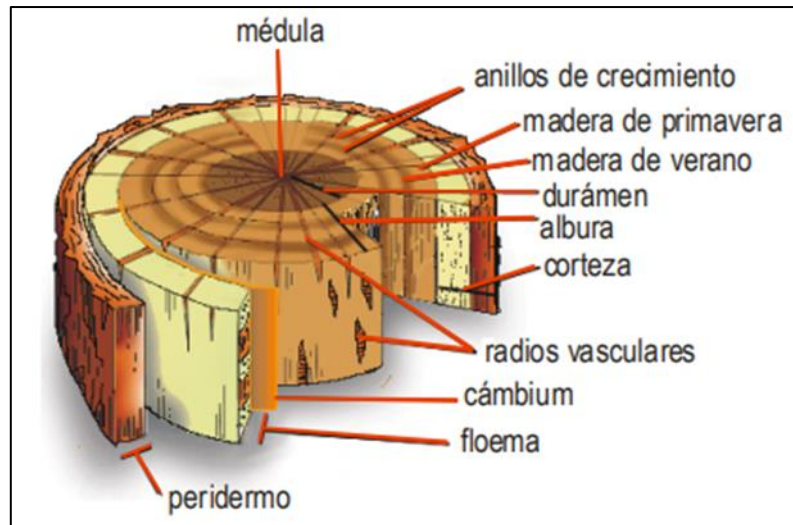
El proceso de fotosíntesis explica por qué los bosques funcionan como sumideros de CO<sub>2</sub>, eliminando este compuesto de la atmósfera. El CO<sub>2</sub> atmosférico se fija en las partes de clorofila de la planta y el C se integra a moléculas orgánicas complejas que posteriormente son utilizadas por la planta. El ciclo del C (fotosíntesis, respiración de las plantas y degradación de la materia orgánica) en un bosque determinado está influenciado por las condiciones climáticas y las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub>. La distinción entre factores naturales y humanos que influyen en el crecimiento de las plantas es a veces muy difícil de hacer. El aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera tiene un "efecto fertilizante" en la fotosíntesis y, por lo tanto, en el crecimiento de las plantas (IPCC, 2001).

Varios modelos bioclimáticos indican que la capacidad de absorción de los ecosistemas se acerca a su límite superior y debería disminuir en el futuro, posiblemente incluso revertir la dirección dentro de 50 a 150 años, con los bosques convirtiéndose en una

fuentes netas de CO<sub>2</sub>. El calentamiento global podría causar un aumento en la respiración heterotrófica y la descomposición de la materia orgánica, y una disminución simultánea de la efectividad del sumidero, transformando así los ecosistemas forestales en una fuente neta de CO<sub>2</sub> (Scholes, 1999).

### **II.3. Impacto del cambio climático en las especies de alta montaña**

El cambio climático ha tenido un impacto en las zonas alpinas, de tal manera que coloca a las especies de alta montaña como especies altamente vulnerables al mismo (Nogués-bravo *et al.*, 2007). Debido a las condiciones presentes que genera el cambio climático, las especies de alta montaña reaccionan de diferente manera una de ellas es teniendo una adaptación local a las condiciones a lo largo del gradiente altitudinal, sin embargo, esto altera las fases del desarrollo de las plantas (Giménez-Benavides *et al.*, 2007). Otro de los efectos del cambio climático a las especies alpinas es la disminución de la calidad y cantidad de hábitat disponible, lo cual fragmenta las poblaciones obligándolas a buscar nuevos sitios para su supervivencia, en este sentido las especies arbóreas migran hacia altitudes mayores por arriba de su límite de distribución altitudinal (García-Fernández, 2011). Los cambios de las especies arbóreas debido a la migración altitudinal y a las fluctuaciones climáticas a las que se enfrentan se ven reflejados en su fisiología, especialmente en su crecimiento y formación de la madera, dejándolas por un periodo de tiempo en un estado de dormancia. En este sentido y para fines de esta tesis es necesario conocer la formación de las especies arbóreas principalmente las plantas gimnospermas que se desarrollan en climas con una estacionalidad marcada. Estas especies presentan la madera del tronco, raíces y ramas de los árboles formados por un conjunto de células que conforman el tejido xilemático o xilema, hecho por un conjunto de células morfológicamente muy diferentes. En la sección transversal del tronco de un árbol se distinguen diversas estructuras, comenzando por el centro, se encuentra la médula, un conjunto de células que recorren el tronco por su eje central. La médula, que en sección transversal tiene forma poligonal o estrellada, corresponde a la zona por la que se produce el crecimiento en altura por el meristemo apical de la planta. Alrededor de la médula se van originando progresivamente los anillos de crecimiento (Fig. 3).



**Figura 3.** Principales formaciones celulares de plantas gimnospermas, (Fuente: [http://www.ub.edu/ecologia/carlos.gracia/PublicacionesPDF/La\\_madera.pdf](http://www.ub.edu/ecologia/carlos.gracia/PublicacionesPDF/La_madera.pdf)).

Cada anillo de crecimiento está formado por un conjunto inicial de células que constituyen la denominada madera temprana o madera de primavera y un conjunto final de células que originan una franja más oscura y que se conoce como madera tardía o madera de verano. Con frecuencia, y sobre todo en los árboles de cierta edad, la parte central del tronco presenta un color más oscuro que se conoce con el nombre de durámen y se diferencia de la corona de madera más externa, generalmente de color más claro, que constituye la albura (Gracia, 2005).

### III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

*Pinus hartwegii* es considerado como una especie altamente vulnerable al cambio climático, especialmente al incremento de la temperatura ambiental generado por el aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (IPCC, 2000). *Pinus hartwegii* ha sido reportada como una especie sumamente sensible a los cambios en temperatura ambiental reportándose la disminución gradual de su crecimiento conforme se incrementa la altitud hacia el límite superior de sus bosques en comparación con individuos de la misma edad que se encuentran en el núcleo del bosque (Alfaro-Ramírez *et al.*, 2017; Körner, 2010). Además de la presencia de individuos de esta especie por arriba de dicho límite (4 200 m; García-Martínez, 2013) y una la disminución de su crecimiento radial con la precipitación y eventos extremos como “El Niño” (Astudillo-Sánchez *et al.*, 2016). Sin embargo, la precisión de estos estudios podría ser muy baja, en cuanto a la cronología y datación de los anillos con relación a eventos climáticos extremos debido a la presencia de anillos falsos o no detectables a simple vista resultado de un extremadamente lento crecimiento. Más aún, determinar el año exacto del establecimiento a través de anillos de crecimiento de los individuos por arriba de su límite de distribución altitudinal y adjudicarlo a determinados eventos climáticos, podría llevar a imprecisiones importantes dado que este tipo de especies presentan un estado cespitoso al inicio de su crecimiento; es decir, una reducción significativa en su crecimiento que puede llegar a prolongarse hasta siete años (González-Rosales y Rodríguez-Trejo, 2004). Si bien, en México existen diversos trabajos en relación con la determinación la capacidad de *P. hartwegii* para almacenar C tanto en la parte aérea como subterránea, existen pocos estudios que aborden la dinámica espacial (gradiente altitudinal) y temporal (dendrocronología) del C almacenado (tanto en el suelo como en la biomasa arbórea) y su dependencia del balance entre las entradas y salidas de C del ecosistema.

#### IV. JUSTIFICACIÓN

Determinar la variación del crecimiento mediante la combinación de técnicas dendrocronológicas y densitométricas permitirá conocer con mayor precisión la variabilidad temporal del crecimiento de individuos arbóreos ubicados a través del gradiente altitudinal del Nevado de Toluca. Lo anterior en conjunto con la determinación de las existencias de COS contribuirá a entender el impacto potencial del incremento de temperatura ambiental sobre la ecología y futuro de los bosques de *P. hartwegii*; particularmente en lo referente a su papel en la mitigación del cambio climático global mediante el almacén de C a largo plazo, entre otros múltiples servicios ecosistémicos que estos ecosistemas proveen.

## V. HIPÓTESIS

Dado que la producción de biomasa vegetal depende directamente de la temperatura y está directamente relacionada con la cantidad de C que entra al suelo, los almacenes de COS coincidirán con crecimiento radial de *P. hartwegi* a lo largo del gradiente altitudinal en el Nevado de Toluca.



## VI. OBJETIVOS

### Objetivo General

Determinar el efecto de la variabilidad climática sobre el crecimiento radial (acumulación de biomasa) y la acumulación de COS en *P. hartwegii* del Nevado de Toluca.

### Objetivos específicos

- ✚ Determinar el efecto espacial y temporal del clima sobre el crecimiento radial (acumulación de biomasa) de *P. hartwegii* en el Nevado de Toluca.
- ✚ Evaluar el efecto de la altitud sobre las existencias de COS en bosques de *P. hartwegii* en el Nevado de Toluca.

## VII. MATERIALES Y MÉTODOS

### VII.1. Sitio de muestreo

El sitio de muestreo se llevó a cabo en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, ubicada entre los valles de Toluca y Tenango (19 ° 06 '06 "N 99 ° 46' 03" W); esta zona tiene un rango altitudinal de 3 000 m a 4 680 m (Körner y Paulsen, 2004). El tipo de suelo predominante es Andosol, en el 90% del área, seguido de feozem, regosol, cambisol y latosol (Körner y Paulsen, 2004). El clima es frío con una temperatura promedio anual de -2 °C a 5 °C (García, 1990). La región tiene un comportamiento isotérmico y la temperatura más alta ocurre antes del solsticio de verano (Challenger y Soberón, 2008). Aunque las lluvias pueden ocurrir en cualquier época del año, la temporada de lluvias se extiende de mayo a octubre, siendo julio el mes más lluvioso y las nevadas son comunes en invierno. En promedio anual, se acumulan de 5.6 a 9.8 días de granizo, principalmente de mayo a octubre (Perry, 1991). El Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca constituye un área biogeográfica relevante a nivel nacional, ya que es representativa de varios ecosistemas que necesitan ser preservados y restaurados, en su interior existe un importante gradiente altitudinal dominado por el bosque de *P. hartwegii* que se observa entre 3 500 m y 4 000 m (Calderón de Rzedowski y Rzedowski, 2005; Challenger y Soberón, 2008).

### VII.2. Especie de estudio

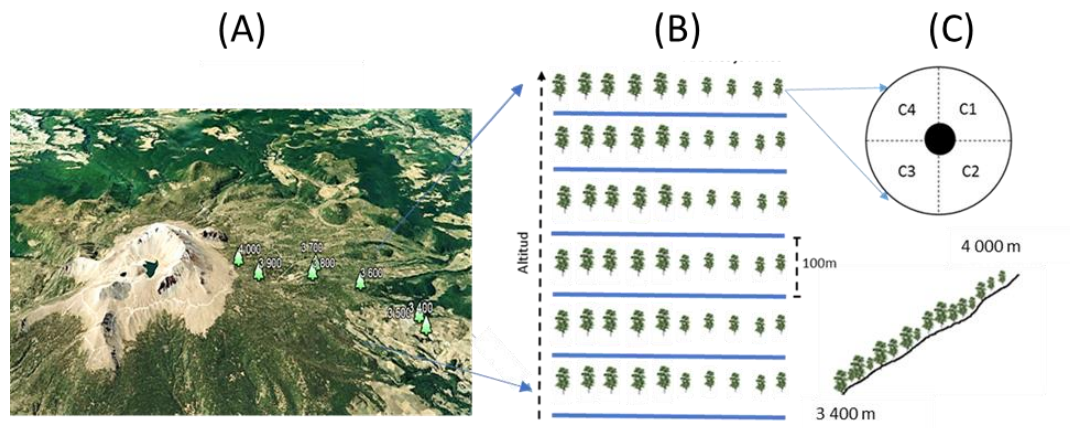
*P. hartwegii* es un pino nativo de las montañas de México y América Central. Crece en las cordilleras: Sierra Madre Occidental y Sierra Madre Oriental (latitud 29 ° norte) desde el estado de Chihuahua y Nuevo León (26 ° N) hasta las cumbres más altas en las montañas en la frontera entre El Salvador y Honduras (latitud 15 ° N) Crece en altitudes de 3 400 m a 4 200 m, siendo la única especie de pino reportada a esta altura (Campos, 1993). Fisionómicamente es una comunidad abierta, con un estrato arbóreo que alcanza los 25 m a 35 m de altura, pero son árboles que disminuyen en altura y diámetro a medida que se acercan al límite altitudinal (Hernández *et al.*, 2005; Alfaro-Ramírez *et al.*, 2017).

*P. hartwegii* forma una masa forestal monoespecífica, con presencia esporádica de individuos de otras especies de *Pinus*, *Quercus*, *Arbutus* y *Juniperus*, particularmente en el límite altitudinal más bajo (Camarero y Gutiérrez, 2004). Esta especie está fuertemente adaptada a las temperaturas extremadamente bajas (-30 °C) comunes en esta zona alpina (Eguiluz, 1978; Perry, 1991), soportando la nevada durante el invierno (Challenger y

Soberón, 2008). Han sido reportados cambios en la distribución altitudinal de *P. hartwegii* en el Parque Nacional Izta-popo (Beaman, 1962), Nevado de Toluca (Lauer, 1973) y Cofre de Perote (Iglesias y Tivo, 2006), asociados con cambios en la temperatura local.

### VII.3. Diseño de muestreo

El diseño de muestreo se llevó a cabo a lo largo de un gradiente altitudinal de 600 m (3 400 m a 4 000 m) en la exposición noreste del Nevado de Toluca (Fig. 4A), el gradiente altitudinal se estableció al ascender cada 100 m de altitud, se realizó un muestreo estratificado al azar, que consistió en seleccionar 20 árboles en cada una de las altitudes (Fig. 4B).



**Figura 4.** Establecimiento sobre el gradiente altitudinal y representación de los cuadrantes para el muestreo de suelo bajo árboles de *P. hartwegii* en el Nevado de Toluca.

De cada uno de los árboles se extrajeron los núcleos con un taladro Pressler de 12 y 14 pulgadas (Fig. 5; Resultados VIII.1), más tarde los núcleos se colocaron en popotes cubriendo los extremos con cinta adhesiva para evitar la formación de hongos, los popotes se etiquetaron de acuerdo con el diámetro del árbol y el sitio, en total se obtuvieron 140 núcleos. Las muestras se obtuvieron durante la semana del 13 al 17 de febrero de 2017. Los 140 núcleos se analizaron en el Instituto Nacional de Investigación Agronómica de Francia (INRA, Val de Loire. Orleans, Francia) en donde se analizaron generando radiografías de rayos X con una precisión de 0.25 x 1.00 mm, operando entre 15 y 20 KV. Posteriormente las radiografías se transfirieron al software Logiciel WinDendro versión 2008e, el Logiciel se presenta como una llave USB. En este software, las imágenes

escaneadas se procesaron para poder delimitar los anillos de crecimiento, así como el comienzo (corteza) y el centro del árbol de cada uno de los núcleos, se generaron perfiles de crecimiento de cada uno de los núcleos analizados en el software R con el cual se pudieron analizar las anomalías que pudieran haber presentado los núcleos al momento de analizarlas con el primer software mencionado.



**Figura 5.** Extracción de núcleos de *P. hartwegii*.

Por otro lado, se realizó un muestreo aleatorio estratificado a lo largo de un gradiente altitudinal (Resultados VIII.2.), con sitios de estudio ubicados en la zona noreste del volcán Nevado de Toluca (Fig. 4A). En cada nivel altitudinal, se seleccionaron 20 árboles de *P. hartwegii*. Para cada árbol, el suelo se dividió formando una circunferencia imaginaria de 5 m de diámetro y dividiéndola en cuatro cuadrantes (Q1, Q2, Q3 y Q4; Fig. 4C). Posteriormente, se tomaron dos muestras de suelo: Q1 y Q3 para árboles impares, y Q2 y Q4 para árboles pares. Las muestras de suelo se extrajeron con tubos de PVC de 16 cm de longitud y 10 cm de diámetro (Fig. 6), introducidos solo 15 cm, la colecta fue del 24 al 28 de noviembre de 2016.



**Figura 6.** Muestreo de núcleos de suelo bajo árboles de *P. hartwegii* en el Nevado de Toluca.

Las muestras de suelo se procesaron en el laboratorio del Instituto de Ciencias Agrícolas y Rurales perteneciente a la Universidad Autónoma del Estado de México. Estas muestras se secaron al aire libre durante una semana; las rocas y el material orgánico visible se eliminaron antes de tamizar la muestra de suelo, para lo cual se utilizó un tamiz de acero inoxidable con aberturas de 2 mm de diámetro (malla 10). Las existencias de SOC se estimaron mediante el método de Walkley y Black (1934) y la textura del suelo por el método de Bouyoucos (1962). Posteriormente, los resultados se analizaron utilizando el triángulo textural del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2014). La densidad aparente del suelo (BD) de cada muestra se determinó mediante el método del cilindro. El pH del suelo se obtuvo mediante el método del potenciómetro (Sadzawka *et al.*, 2007) con un equipo OAKTON pH / CON500 previamente calibrado con soluciones tampón pH= 4, pH= 7 y pH= 10, usando soluciones 1: 2 de KCl 1N.

## VIII. Resultados

VIII.1. Climate control on tree growth of *Pinus hartwegii* along an altitudinal gradient (3400-4000 m) at Central Mexico.

VIII.2. Soil organic carbon stocks in *Pinus hartwegii* Lindl., along an altitudinal gradient from 3400 to 4000 m at Central Mexico.

## VIII.1 Relationship between climatic variables and ring growth characteristics of *Pinus hartwegii* along an altitudinal gradient (3400-4000 m) at Central Mexico

### Preámbulo

El presente artículo fue llevado a cabo con la finalidad de conocer la relación entre las características de crecimiento de los anillos anuales de los árboles de *P. hartwegii* a lo largo del gradiente altitudinal de 600 m en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, con las variables climáticas asociadas a temperatura y precipitación provenientes de dos estaciones meteorológicas, Nevado de Toluca (NT), ubicada a 4 139 m, y Tenango del Valle, localizada a una altitud de 2 650 m. Fue importante conocer tanto la amplitud del anillo como la densidad del mismo para determinar la cantidad de biomasa producida en los anillos anuales a lo largo de 52 años y sobre el gradiente altitudinal en estudio.

### Abstract

*Pinus hartwegii* the Mexican pine of the heights, is considered highly vulnerable to the climatic change, due to the adverse climatic conditions present in the altitude, this pine has responded by means of changes in its radial growth, in this sense the use of rings of trees in studies dendroclimatológicos, determine the relationships between tree growth and registered climatic parameters. However, no studies are reported for *Pinus hartwegii* using dendrochronological and densitometric techniques to determine ring width and ring density to evaluate biomass production of annual rings during tree life in combination with altitudinal gradients that allow to know the impact on biomass production and whether these variables remain constant along the altitude in the gradient. The objective of this study is to determine the biomass produced annually by *P. hartwegii* through the characteristics of the growth rings. A stratified random sampling was carried out along an altitudinal gradient of 600 m (3 400 m to 4 000 m). At each altitude, 20 trees were selected, from which nuclei were extracted, which were analyzed by dendrochronological and densitometric techniques and subsequently analyzed. They crossed with data from the Nevado de Toluca (NT) and Tenango del Valle (TV) weather stations. The results show that there is no defined altitudinal pattern of ring width, average density and annual-ring biomass; which showed maximum and minimum values the lowest value was found at 3 400 (2.26 g cm<sup>-1</sup>) and the highest value

was found at 3 500 m ( $6.40 \text{ g cm}^{-1}$ ). Regarding the impact of climatic variables on growth, this varied with the growing season. However, the aridity index was a factor that significantly influenced the amplitude of the ring and its density in both seasons; and only on TV about biomass.

**Key words:** biomass, ring width, ring density, temperature, precipitation

## 1. Introduction

Almost 90 % of carbon (C) in global biomass is in the forest trees, and their dynamic of C allocation is crucial to global biogeochemical C-cycle, as well to the organism ecophysiology growth and survivor (Imaji and Seiwa, 2010). The C present in the plant biomass enters the ecosystem through photosynthesis that allows the capture of CO to produce carbohydrates that accumulate in the plant biomass where they remain stored CO<sub>2</sub>, however, is also a greenhouse gas that has increased at a rate of 0.11 ppm/yr (IPCC, 2017) over the last five years. The increase of this GHG has generated an intensification in global temperatures, which is why the current global warming is attributed to it. Through this, CO<sub>2</sub> directly and indirectly affects the physiology and growth of trees located at high altitudes and latitudes (Qian *et al.*, 2010). These ecosystems are considered among the most sensitive ecosystems to the increments in temperature associated to the current climatic change (Körner and Paulsen, 2004; Biondi, 2001; Savva *et al.*, 2006).

The CO<sub>2</sub> increases result in a direct fertilizer effect promoting a higher photosynthesis rate and productivity (Stinziano and Way, 2014); and indirectly through increase in the environmental temperature, which might relax the stress imposed by low temperatures and after the tree growth responses to climate over time (Soulé and Knapp, 2006; Tardif *et al.*, 2003; Körner, 2012). However, contradictory results have been reported like a consistent response of radial growth-climate at high- and low-elevation sites (Liang *et al.* 2010; Yang *et al.* 2013); and even no control of temperature on inter-annual variability in the trees growth, but to aridity conditions in the soils (Dapao *et al.*, 2006; Yang *et al.* 2013). Therefore, there is great concern because the impacts that the increase in temperatures will have on C balance of alpine forest ecosystems, which could become a source of CO<sub>2</sub> instead of a sink, exacerbating climate change.

Alpine trees response to temperature increasing, however, is not lineal, its depend on tree growth rate (Tjoelker *et al.*, 1998), the tree capacity to adapted to the new climatic conditions, soil moisture and nutrients availability, as well how close are the trees to their



optimal thermal growth (Lyu *et al.*, 2017). Those drivers even, could act differentially at several spatial scales across the distribution area of a tree species, leading to less congruent response of growth response to climate at the site and tree levels (i.e. at lower and higher elevations) (Rapp *et al.*, 2012; Qin *et al.*, 2018). Therefore, to determine tree growth patterns along altitudinal gradients could lead to better understand and predict the response of a forest ecosystem to climate change (Liangh *et al.*, 2010). In this context altitudinal gradients are powerful natural experiments to test ecological and evolutionary responses of biota to low temperatures, leading to separate thermal from seasonal effects (Körner, 2007). In addition, the use of tree-rings in dendroclimatological studies, lead to determine the relationships between tree growth and recorded climate parameters, reconstructing year by year the impact the tree-growth conditions. Even it is possible to estimate the storage C in the trees through their growth traits, particularly the density of tree rings (Qin *et al.*, 2018). This is because the biomass changes or increases as it increases the growth more than the density, however, in general, the biomass is calculated in terms of a constant density (Qin *et al.*, 2008), leading to underestimations or overestimates of the fixed C, depending on the species in question. Therefore, wood density should be used as an essential parameter in the studies of sequestration and storage of C to evaluate the long-term trends in radial growth (Vannoppen *et al.*, 2018).

Few previous studies have been conducted on these topics, but the results have varied among different climate conditions and sites (Hughes, 2002; Acosta-Hernández *et al.*, 2017). *Pinus hartwegii*, the mexican pine of the highs, is developed through a wide range of altitudinal distribution (2 300 m to 4 200 m), so it provides an excellent opportunity to expand the current knowledge of the possible impact of the global temperature increase on the growth of these forests, and both of its ability to capture and store C. In Mexico chronological studies has been development with this species (Gutierrez 1999; Camarero, 1999; Tardif *et al.*, 2003; Biondi *et al.*, 2005 Acosta-Hernández *et al.*, 2017) determining its sensitivity to climatic variables, however no studies are reported using dendrocronological and densitometric technics to determine ring width and ring density to evaluate the biomass production throughout tree life in combination with altitudinal gradients that allow to know the altitude impact in the biomass production, which are the main variables that determine the tree growth throughout their lives, and if these variables remain constant across the altitudinal gradient. The objectives of this work were (1) to determine the biomass produced annually by *P. hartwegii* through the characteristics of the growth rings, (2) identify the main climatic variables that have influenced the production of *P. hartwegii* biomass in the last 52

years and (3) to assess the effect of altitude on the production of *P. hartwegii* biomass along an altitudinal gradient.

## 2. Methods

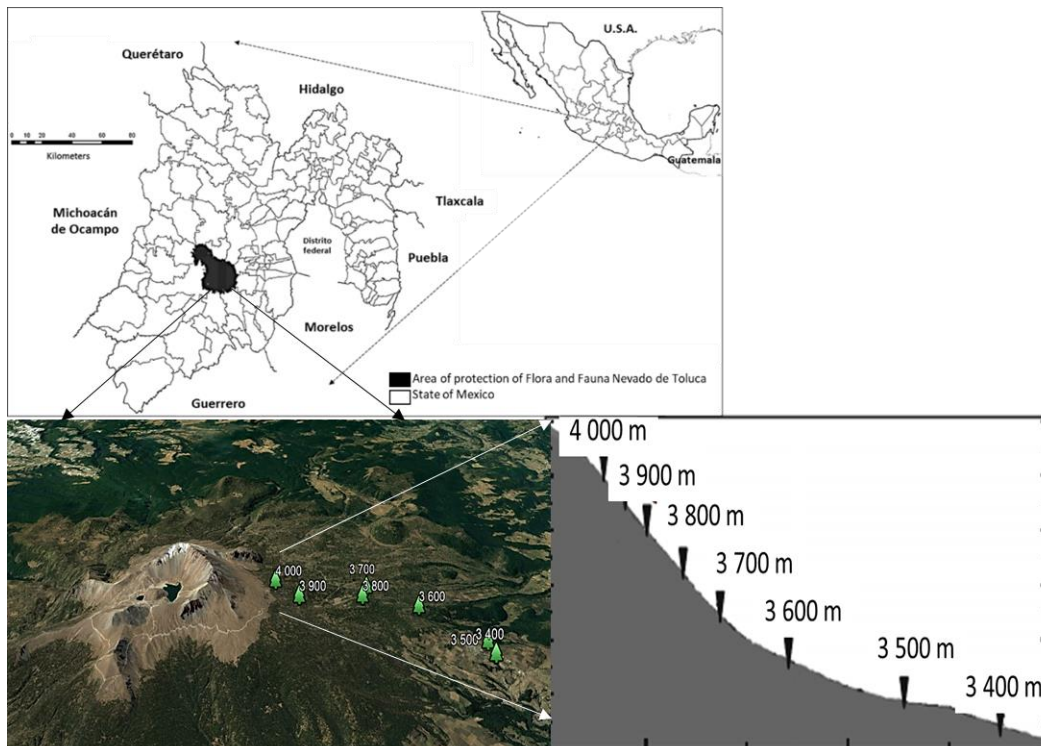
### 2.1. Species of study

*Pinus hartwegii* Lindl. is a pine native to the mountains of Mexico and Central America. It grows in both mountain ranges: Sierra Madre Occidental and Sierra Madre Oriental (latitude 29 ° North) from the state of Chihuahua and Nuevo León (26 °) to the highest peaks in the mountains at El Salvador-Honduras border (latitude 15 ° North). It grows at altitudes from 3 400 to 4 200 m, being the unique pine species reported at this high elevation (Campos, 1993). Physiognomically is an open community, with the arboreal stratum reaching 25 to 35 m in height, but trees decreasing in height and diameter as they approach the upper altitudinal limit (Hernández *et al.*, 2005; Alfaro-Ramírez *et al.*, 2017). *P. hartwegii* forms a monospecific forest mass, with sporadic presence of individuals of other *Pinus* species and *Quercus*, *Arbutus* and *Juniperus*, particularly at the lower altitudinal limit (Camarero and Gutiérrez, 2004). This species is strongly adapted to extreme low temperatures (-30 °C) common in this alpine zone (Eguiluz, 1978; Perry, 1991), enduring the snowfall during the winter (Challenger and Soberón, 2008). Shifts in the altitudinal distribution of *P. hartwegii* in Izta-popo National Park (Beaman, 1962), Nevado de Toluca (Lauer, 1973) and Cofre de Perote (Iglesias and Tivo, 2006), associated with changes in local temperature, have been reported.

### 2.2. Site description

The study was carried out in the Flora and Fauna Protected Area (APFF) “Nevado de Toluca” located in central Mexico (19° 06’ 06” N 99° 46’ 03” W; Fig. 1); this zone has an altitudinal range from 3 000 to 4 680 m (Körner and Paulsen, 2004). The predominant soil type is Andosol, in 90 % of the area, followed by feozem, regosol, cambisol and latosol (Körner and Paulsen, 2004). Climate is cold with an average annual temperature of -2 °C to 5 °C (García, 1990). The region has isothermal behavior and highest temperature occurs before summer solstice (Challenger and Soberón, 2008). Although rainfall can occur at any time of the year, rainy season runs from May to October, with July being the wettest month,

and snowfall is common in winter. Annually, on average, 5.6 to 9.8 days of hail accumulate, mostly from May to October (Perry, 1991). Nevado de Toluca constitutes a relevant biogeographic area at a national level, since it is representative of several ecosystems that need to be preserved and restored, inside of it, there is an important altitudinal gradient dominated by *P. hartwegii* forest which is observed between 3 500 and 4 000 m (Calderón de Rzedowski and Rzedowski, 2005; Challenger and Soberón, 2008).



**Figure 1.** Location of the Flora and Fauna Protected Area “Nevado de Toluca” and the sampling sites along the altitudinal gradient (Own elaboration).

### **2.3. Sampling design**

Study sites are in the northeast exposure of the Nevado de Toluca along an altitudinal gradient. The altitudinal gradient was established by ascending every 100 m from 3 400 m, the beginning of *P. hartwegii* to 4 000 m, a stratified random sampling was carried out, which consisted of selecting 20 trees in every altitudinal floor from which the wood cores were extracted with a Pressler drill of 12 and 14 inches, being 140 cores. The cores were placed in plastic straws covering the ends with adhesive tape to prevent the formation of fungus, the straw was labeled according to the diameter of the tree and the site. The samples were obtained during the week of February 13 to 17, 2017.

The 140 cores were left to dry in the open air. Afterwards, wood cores or tree-ring cores were analyzed in the National Institute of Agronomic Research of France (INRA, Val de Loire), where they were cut uniformly to a thickness of 1.57 mm, after which the radiographs were generated in which the X-ray beam was 0.25 x 1.00 mm, operating between 15 and 20 KV and approximately 2 m. The radiograph images were read and transferred with the software called Logiciel WinDendro version 2008e. In this software the scanned images were processed to be able to delimit the growth rings, as well as the beginning (cortex) and the center of the tree of each one of the cores.

### **2.4. Statistical analysis**

The characteristics of the rings such as width and density were obtained by software R where the data previously generated in the Windendro software were analyzed, also after having obtained the data, they were adjusted according to their age cambial. Subsequently, data was obtained from two meteorological stations Nevado de Toluca and Tenango del Valle, where, using simple mathematical operations, the temperatures and rainfall of the seasons of the year as well as the growing season and the aridity index were generated. in a 52-year period from 1964 to 2016. To estimate the annual average temperature, the annual temperature data were used as expressed in the meteorological information. Summer temperature was estimated by adding the months of July, August and September between three, the autumn with the months of October, November and December between three. The winter with the months of January, February and March between three. The temperature of the growing season was obtained by adding the months of April, May, June, July, August and September by six. The annual precipitation was the sum of the precipitations of all the months, the precipitation of spring was obtained adding the months

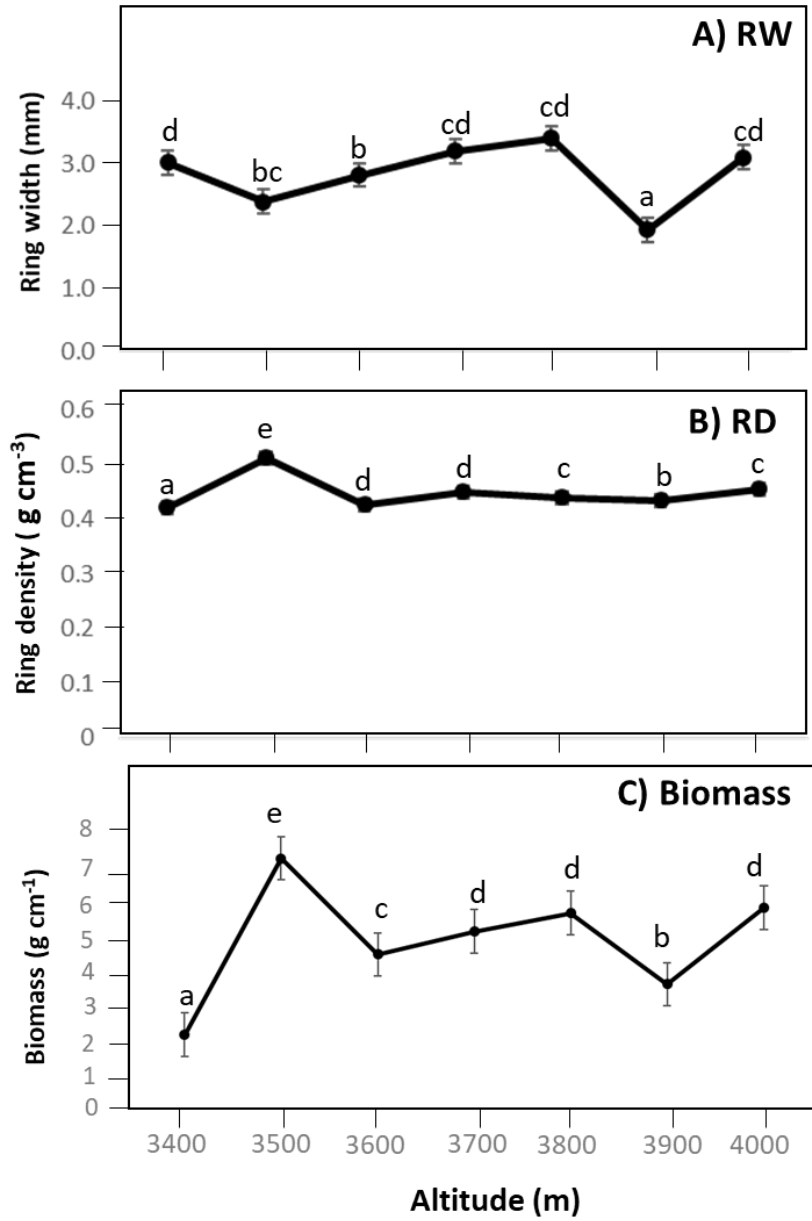
of April, May and June. The summer rainfall was obtained by adding the months of July, August and September. The precipitation of the growing season was obtained by adding the months of April, May, June, July, August and September. The aridity index was obtained by the square root of the degrees per day accumulated among the annual rainfall. In addition, the basal area had to be estimated using the same software R, and subsequently the biomass data was obtained by multiplying the average density of the ring by the area previously generated. Then a Pearson correlation was carried out, where the statistically significant relationships were obtained with 95 % and 99 % significance. After that a relationship between the variables of biomass and the period established (1964-2016) in each of the altitudinal floors of the altitudinal gradient under study.

### 3. Results

#### 3.1. *Ring properties along the altitudinal gradient*

Ring width along the altitudinal gradient shows a non-linear behavior (Fig. 2A) where it is observed that at the beginning of the gradient (3 400 m) it exceeds 2.8 mm in width, at the next altitude (3 500 m) a considerable decrease of the width to 2.1 mm is noted, from 3 600 m the ring width begins to increase and it is maintained until 3 800 m, and then decreases again at the upper elevations. Considering the general trend, it appears that the optimum growth in terms of ring width occurs at mid-elevations, between 3 700-3 800 m

In the case of ring density, the behavior observed is almost linear (Fig. 2B). Except for the value obtained at 4,500 m elevation, which was the highest, the average ring density values at all other elevations fluctuated between  $0.4 \text{ g cm}^{-3}$  and  $0.450 \text{ g cm}^{-3}$ , with a steady linear trend, slowly increasing with elevation. The behavior of the annual-ring biomass along the gradient is a non-linear behavior (Fig. 2C), where at the beginning of the gradient it shows the lowest value ( $2.26 \text{ g cm}^{-1}$ ), the highest value is found at 3 500 m ( $6.40 \text{ g cm}^{-1}$ ) later a decrease in biomass is observed, nevertheless, it is maintained in constant ascent up to 3 800 m ( $5.12 \text{ g cm}^{-1}$ ) at 3 900 m again a decline is seen but at 4 000 m the ring biomass ( $5.24 \text{ g cm}^{-1}$ ) rises.



**Figure 2.** Ring width (A), ring density (B) and biomass (C) in *Pinus hartwegii* forest along an altitudinal gradient from 3 400 m to 4 000 m (600 m) in the Nevado de Toluca.

### 3.2. Effect of climate on ring growth

**Table 1.** Pearson correlation between ring variables and climatic variables of Nevado de Toluca and Tenango del Valle meteorological stations.

	Tma	Tmv	Tmo	Tmi	Tmec	PPa	PPp	PPv	PPec	Arl
<b><i>Nevado de Toluca</i></b>										
<b>RW</b>	0.077	<b>0.275*</b>	<b>0.204*</b>	0.108	0.266	0.052	0.074	0.269	0.124	<b>-0.335**</b>
<b>RD</b>	-0.077	-0.356	-0.200	-0.183	-0.066	-0.1196	-0.124	-0.205	<b>-0.314*</b>	<b>0.329**</b>
<b>Ring biomass</b>	-0.019	-0.265	-0.119	-0.206	-0.171	<b>0.296*</b>	-0.007	0.202	0.183	-0.197
<b><i>Tenango del Valle</i></b>										
<b>RW</b>	-0.055	0.097	-0.118	-0.022	-0.045	0.008	0.237	<b>0.274*</b>	<b>0.281*</b>	<b>-0.286*</b>
<b>RD</b>	0.096	<b>-0.294*</b>	0.196	0.246	<b>-0.293*</b>	-0.005	-0.196	<b>-0.319*</b>	<b>-0.305*</b>	<b>0.347*</b>
<b>Ring biomass</b>	<b>0.358**</b>	-0.075	<b>0.375**</b>	<b>0.501**</b>	0.001	0.030	-0.164	-0.208	-0.228	<b>0.314*</b>

\* Correlation is significant at the 95 % confidence level; \*\* Correlation is significant at the 99 % confidence level; RW: Ring width; RD: Ring density; Tma: Average annual temperature; Tmv: Average summer temperature; Tmo: Average autumn temperature; Tmi: Average winter temperature; Tmec: Average growth season temperature; PPa: Annual precipitation; PPp: Spring precipitation; PPv: Summer precipitation; PPec: Growth season precipitation; Arl: Aridity index

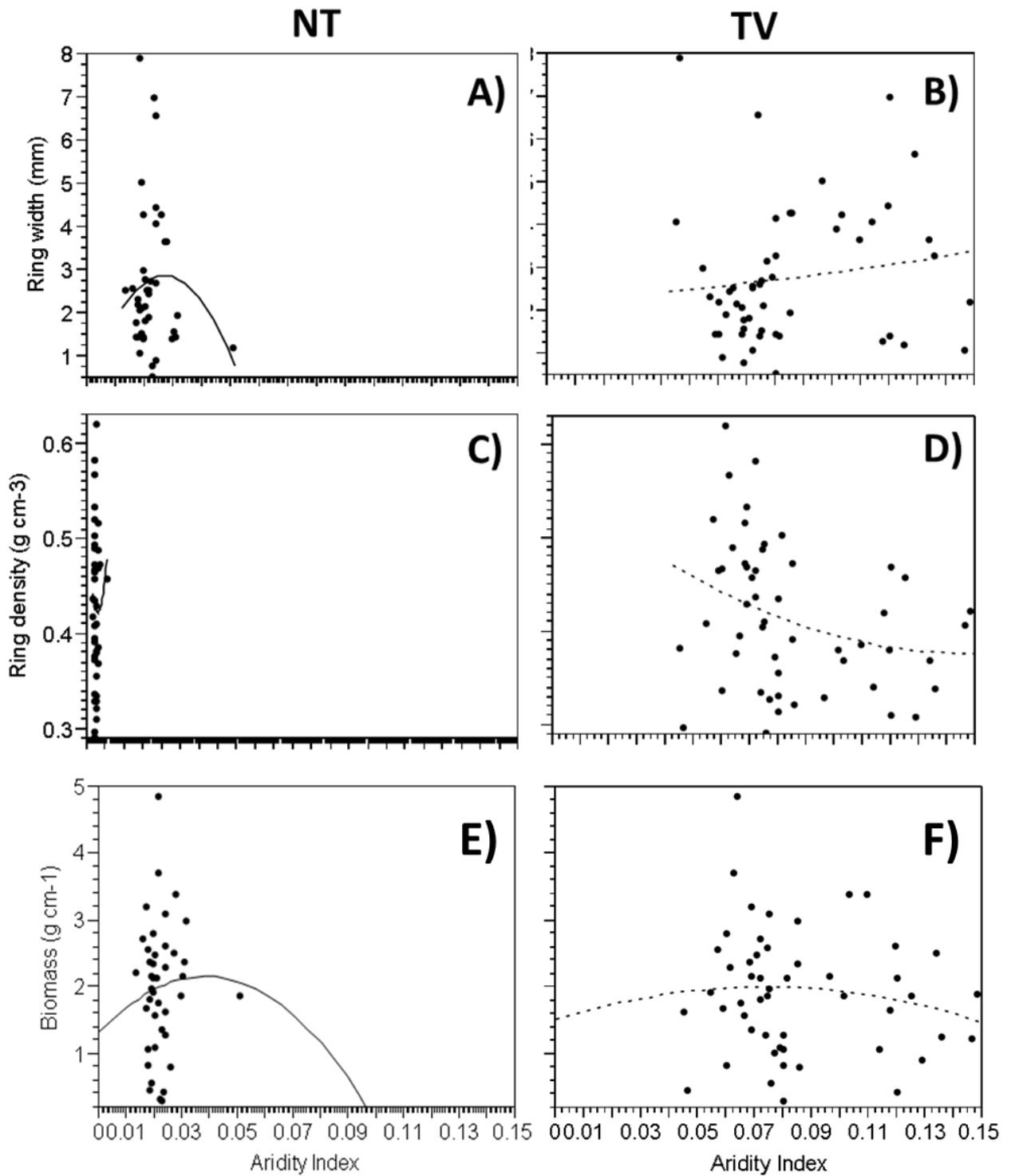
It is noted that the average summer temperature has a positive effect on the width of the ring in the Nevado de Toluca station, in addition the average temperature of autumn is also positively related to the width of the ring, however, the aridity index is found in negative shape in relation to the width of the ring. Another characteristic that is found in negative form is the precipitation in the growing season with the density of the ring, this last one is in a positive way with the aridity index. In the Tenango del Valle station, ring density has a positive effect with precipitation in summer and in the growing season, however, it has a negative effect with the aridity index. The density of the ring is negatively related to the summer temperature, the temperature of the growing season, the precipitation in summer and the precipitation in the growing season, however, with the aridity index has a positive effect. The biomass of the ring has a positive effect with the annual average temperature, the autumn temperature, the winter temperature and the aridity index. An interesting aspect is that in general terms we observe more or less the same pattern of correlations: The summer precipitation and the growing season is more important; the effect is positive on ring growth (width), but negative on density. The effect of the

aridity index in the same way stands out since it is the common factor in both meteorological stations.

### **3.3. *Relation aridity index variables and ring variables***

Based on the results shown in Pearson correlation, the coincident data were identified between both meteorological stations and in this way the regressions were generated to observe their behavior. Ring width in Nevado de Toluca station (Fig. 4A) has little variability in relation to the aridity index, the regression is seen descendant and the data are grouped from 0.01 to 0.03, the quadratic model shows an  $R^2 = 0.0365$ , very weak. In contrast to the data present in the Tenango del Valle station, since the data show a wide variability (Fig. 4B), the regression looks positive upward, however, the correlation is very weak ( $R^2 = 0.0196$ ). Ring density in Nevado de Toluca weather station shows little variability in the data (Fig. 4C), all stacked in the values from 0 to 0.01 and showing an  $R^2 = 0.0113$ , contrary to what happens in Tenango del Valle weather station where the data show a wide variability (Fig. 4D), showing a descendant regression ( $R^2 = 0.0912$ ). What is observed in question to the biomass of the ring reported together with the aridity index of the Nevado de Toluca estuary is that the variability of the data is small in comparison with the dispersion of the data found in the meteorological station Tenango del Valle, in the NT station, we observe the data grouped between 0.1 and 0.03, in TV the dispersion is very wide from 0.05 to 0.15, the regression line in NT is observed as descending ( $R^2 = 0.0059$ ), that of TV the line is seen, however it has a slight drop as the aridity index increases ( $R^2 = 0.0180$ ).





**Figure 4.** Relation between Aridity index and ring width (A), ring density (B) and biomass (C) in both meteorological stations Nevado de Toluca (NT) and Tenango del Valle (TV).

#### 4. Discussion

The increase in CO<sub>2</sub> has generated great uncertainty regarding its impact on the ecology and subsistence of current alpine ecosystems, especially in the consequences on the balance of C of these ecosystems, considered to be the most sensitive to the increase in temperature. Therefore, in this study tree growth patterns and biomass production of *P. hartwegii* were determined along altitudinal gradients to better understand and predict the response of a forest ecosystem to climatic variability from global warming.

The results of the present study showed that altitude does not have a significant effect on ring characteristics such as ring width, average density and biomass produced in the last 52 years. This agrees with that reported by Yang *et al.* (2013), who also did not find a significant correlation of the characteristics of the rings with elevation. According to Kölh *et al.* (2017), some trees show fluctuating periods of high growth and low growth, which could explain the fluctuation in growth found in *P. hartwegii* in this study where the maximum biomass production in the growth rings was recorded at 3 600 m and 3 500 m of altitude with approximately 2 770 g (Fig. 6). According to the growth model generated by Yaqoob *et al.*, (2017), the increase of biomass over time is more sensitive to changes in radial growth than the density of wood. However, according to these authors, assuming that wood density is constant in most studies of C sequestration is incorrect, leading to sub- or over-estimates of increases in biomass depending on the type of species. The altitude or location of the meteorological stations had a direct impact on the correlation of climatic variables and the characteristics of the rings. Recalling that Nevado de Toluca (NT) station is at 4 139 m, while that of Tenango del Valle (TV) at 2 560 m, contrary to what we expected the meteorological station at lower altitude, showed higher correlations or showed the significance of more variables in growth. The density of the growth rings turned out to be a variable sensitive to the climatic data registered in both meteorological stations. In the case of the biomass in the climatic data of the high part they showed that this variable is influenced by the annual average precipitation, while with the data of the low part they indicate that the biomass in the growth rings is positively influenced by the temperatures annual average, autumn average and winter, as well as the aridity index.

According to Yang *et al.* (2013), there is no contrasting control of the growth of trees located at low and high altitude; in addition to the interannual growth of the trees located in

the upper part of the altitudinal distribution is the result of the stress generated by the conditions of aridity in the sampling sites. However, it is important to consider the altitudinal ranges and the gradient amplitude used in very narrow gradients there may not be enough distance, depending on the site, to reflect significant changes in temperature and precipitation conditions.

In this study, the correlation between the aridity index and ring width is significant both below and above are negative; thus, the aridity index could be considered as the common climatic factor that influences tree growth in the study area (Gao *et al.*, 2013), regardless of altitude. However, a greater adjustment of the data is shown (greater accumulation, less variability) indicating a dominant influence of this variable in the station that is at 4 300 m, that of the NT. In such a way that both ring width and density are practically related in an inverse but significant way. That is, the relationship between precipitation and temperature has a greater influence on the amplitude of the ring and its density. It could be an indicator of the differentiated influence between individuals located at higher altitudes than at lower ones. In this sense, Fig.6 suggests that the controls that exist between the trees at the lowest altitudes such as 3 400 m and 3 500 m could differ from those located at the subsequent altitudes. At this altitude biomass production is the lowest and the lowest variability with a range of 5-1,163 g in the 3 400 m and 2.0-2777.34. According to Ettinger *et al.* (2011) the effects of climate can control growth above local conditions and processes, leading to a synchronous annual growth among individuals in high elevation species. While at lower altitudes the effect of climate on growth may be weak for these same species. Regarding the impact of climatic variables on growth, this varied with the growing season. Thus, the climatic data recorded in the NT station showed that the average temperature, summer and autumn, has a significant positive relationship on ring width. The TV station, on the other hand, showed that the precipitation of both the summer and the growing season have a significant influence on the increase in the amplitude of the ring. Both stations show the significant negative influence of the aridity index on the amplitude of growth ring while the aridity index shows that the greater the aridity, the greater the ring density. A factor that dominates over all others, therefore, little variability (3 400 m, Fig. 6G).

According to NT weather station data, shows a high positive correlation of the ring width with the temperature of summer and autumn. Ring density is negatively related to the precipitation of the growing season, the biomass is positively related to the annual

precipitation. Ring width was negatively related to the aridity index, the density is performed with this index in a positive way. Biomass is positively related to annual precipitation. While that of TV, ring width is positively related to summer precipitation and that of the growing season, with the index of aridity negatively. Density is negatively related to the summer temperature and the temperature of the growing season, in addition, it is negatively related to the summer precipitation and the precipitation of the growing season, and to the aridity index positively. The biomass is related to the average annual temperature, the autumn and the winter, and also the aridity index, all positive. The variables of the ring such as width and biomass depend directly on the variables of the current year, while the density of the ring depends on the conditions of the previous year.

Ring width is related to the aridity index, but as a function of the temperatures, that is to say, the greater the drought, the higher temperatures, therefore, the amplitude of the ring will be greater, contrary to that found in the TV weather station, where the ratio of the ring width in conjunction with the aridity index is a function of precipitation, that is, the greater ring width. For ring density in relation to the aridity index in the NT station, it is a function of the temperatures, the lower the precipitation the greater ring width, for the TV station, it is a function of both, as much of the precipitations as of the temperatures. Finally, the biomass in the NT station, in relation to the aridity index indicates that it is a function of rainfall and in the TV station, the relationship between the aridity index and the biomass is a function of the temperatures, the higher Higher temperature biomass. The dispersion of the aridity index data in the NT station shows little variability regarding ring width, density and biomass, contrary to what happens in the TV station, since there the behavior shows a high variability.

## **5. Conclusions**

This study showed that ring width, ring density and biomass do not show a similar pattern along the altitudinal gradient, however, ring width and the biomass coincide in the pattern since the points of greatest accumulation in the both were found at the maximum end, ie at 4 000 m and the lowest was found at 3 400 m of the gradient. Ring width in Nevado de Toluca station is defined by the aridity index, but at a higher temperature, ring density in the same meteorological station is defined in the same way by the aridity index but based on precipitation, it is the same case for the biomass since in this same station it is defined by the precipitation. For the case of the climatic variables coming from Tenango del Valle

station, Ring width is related to the aridity index based on precipitation, the density is related in the same way to the aridity index but both the temperature and the define it. The biomass coincides in the same way with the index of aridity but based on the temperatures. With this we can show that ring width is greater as the precipitation is greater and the density is defined by the temperature, the higher the temperature, the higher ring density. Between both form the biomass which is related with width in terms of formation based on precipitation.

### **Acknowledgements**

The authors are grateful to CONACYT for the Master scholarship and mixed scholarship granted to LCA (No. 746226). To CEPANAF and CONANP for facilitating us the access to the Nevado de Toluca APFF. The present research work was funded by CONACYT-Basic Science No. 219696.

### **References**

- Camarero J.J., Galván, J.D., Gutiérrez, E., 2014. Seeing the trees for the forest: Drivers of individual growth responses to climate in *Pinus uncinata* mountain forests. *Journal of Ecology*. 102, 1244-57.
- Gao L.L., Hua, X.G., Deng, Y., Xue, M.Y., Qian, Z.Z., Ying Z.C., 2013. Dendroclimatic Response of *Picea crassifolia* along an Altitudinal Gradient in the Eastern Qilian Mountains, Northwest China. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 45(4), 491-499.
- Imaji, A., Seiwa, K., 2009. Carbon allocation to defense, storage, and growth in seedlings of two temperate broad-leaved tree species. *Oecologia*. 162, 273-281.
- Köhl, M., Neupane, P.R., Lotfiomran, N.L., 2017. The impact of tree age on biomass growth and carbon accumulation capacity: A retrospective analysis using tree ring data of three tropical tree species grown in natural forests of Suriname. *Plos one*, 12(8): e0181187. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181187>.
- Körner, C. 2007. The use of altitude in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution*. 22, 569-74.
- Körner, C., Paulsen, J., 2004. A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal Biogeography*. 31, 713–732.

- Liang, E., Shao, X., Eckstein, D., and Liu, X., 2010. Spatial variability of tree growth along a latitudinal transect in the Qilian Mountains, northeastern Tibetan Plateau. *Canadian Journal of Forest Research*. 40, 200–211.
- Lo, Y.H., Blanco, J.A., Seely, B., Welham, C., Kimmins, J.P., 2010. Relationships between climate and tree radial growth in interior British Columbia, Canada. *Forstry Ecology Management*. 259, 932–942.
- Mäkinen, H., Nöjd, P., Kahle, H.P., Neumann, U., Tveite, B., Mielikäinen, K., 2002. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. *Forest Ecology and Management*. 171, 243-259.
- Qi, Z., Liu, H., Wu, X., Hao, Q. 2015. Climate-driven speedup of alpine treeline forest growth in the Tianshan Mountains, Northwestern China. *Global Change Biology*. 21, 816-26. doi: 10.1111/gcb.12703 PMID: 25099555.
- Rapp, J.M., Silman, M.R., Clark, J.S., Girardin, C.A.J., Galiano, D., Tito, R. 2012. Intra- and interspecific tree growth across a long altitudinal gradient in the Peruvian Andes. *Ecology*. 93, 2061-72. doi: 10.1890/11-1725.1 PMID: 23094378.
- Sang, W.G., Wang, Y.X., Su, H.X., Lu, Z.H., 2007. Response of tree-ring width to rainfall gradient along the Tianshan Mountains of northwestern China. *Chinese Science Bulletin*. 52(21), 2954–2962.
- Vannoppen, P.B., De, T., Mil, V.K., Quentin, P., Van den Bulcke, J., 2018. Climate driven trends in tree biomass increment show asynchronous dependence on tree-ring width and Wood density variation. *Dendrochronologia*. 48, 40-51. doi.org/10.1016/j.dendro.2018.02.001
- Yu, D., Wang, Q., Geoff, G.W., Dai, L., 2006. Dendroclimatic response of *Picea jezoensis* along an altitudinal gradient in Changbai Mountains, *Science in China: Series E Technological Sciences* 2006 Vol.49 Supp. I 150—159.
- Yang, B., He, M., Melvin, T.M., Zhao, Y., Briffa, K.R., 2013. Climate Control on Tree Growth at the Upper and Lower Treelines: A Case Study in the Qilian Mountains, Tibetan Plateau. *PLoS ONE* 8(7): e69065. doi:10.1371/journal.pone.0069065.
- Yu, D.P., Wang, Q.L., Wang, G.G., Dai, L.M. 2006. Dendroclimatic response of *Picea jezoensis* along an altitudinal gradient in Changbai Mountains. *Science in China: Series E Technological Sciences*. 49, 150—159.

## **VIII.2. Soil organic carbon stocks in *Pinus hartwegii* Lindl., along an altitudinal gradient from 3400 to 4000 m at Central Mexico.**

El presente trabajo se llevo a cabo con la finalidad de conocer los almacenes de COS a lo largo de un gradiente altitudinal en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca y determinar si existió un patrón de los almacenes conforme se asciende en altitud, además de conocer la relación entre variables edáficas que puedan influir en el comportamiento del C presente a lo largo del gradiente, resaltando la importancia del bosque de *P. hartwegii* por su gran capacidad para almacenar COS.

Cabe señalar que este trabajo fue enviado a la revista Catena (20 de febrero de 2018; ver pagina 65) en cumplimiento del envío de un artículo de investigación para requisito de obtención del grado de Maestría en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales.

## Soil organic carbon stocks in *Pinus hartwegii* Lindl., along an altitudinal gradient from 3400 to 4000 m at Central Mexico

Carrillo-Arizmendi L.<sup>1</sup>, Pérez-Suárez M.<sup>1\*</sup>, Vargas-Hernández J.J.<sup>2</sup>, Endara-Agramont A.R.<sup>1</sup>, Rozenberg P.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales, Universidad Autónoma del Estado de México. El Cerrillo Piedras Blancas, 50200. Estado de México, México.

<sup>2</sup>Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, 56230, Texcoco, Estado de México, México.

<sup>3</sup>Institut National de Recherche Agronomique, Órleans Val de Loire, 2163 Avenue de la Pomme de Pin, 45075 Órleans, Francia.

[mperezs@uaemex.mx](mailto:mperezs@uaemex.mx), [marpersua@gmail.com](mailto:marpersua@gmail.com),

Tel. +52 /01 722 2 96 55 52. Ext. 120, Fax. +52/ 01 722 2 96 55 52

### Abstract

The fact that forest soils store 40 percent of the organic carbon (OC) present in the earth surface highlights the great capacity of tree species to capture and transfer C to the soil. *Pinus hartwegii* Lindl., is the pine species located at highest altitude (4 200 m) in the world, and at the same time one of the species that is expected to respond through altitudinal migration to increases in environmental temperature. Nevertheless, low is known about their capacity to storage soil organic carbon (SOC) and less how C in the soil pool could be affected by the climatic change. Therefore, in this research the effect of altitude on the SOC stocks was determined from 3 400 m to 4 000 m in a *P. hartwegii* forest, located at the Nevado de Toluca volcano. SOC stocks were determined in soil samples collected every 100 m in elevation. Results displayed that SOC stocks (15 cm deep) were 173.1 Mg ha<sup>-1</sup> significantly higher at the highest altitude site (4 000 m) than at the lowest altitude 146.8 Mg ha<sup>-1</sup> (3 400 m), showing a clear ascending SOC stocks patterns as the altitude increases. This indicate lowest SOC stocks in site with highest temperatures (lower altitude), confirming that the environment temperature increases due to global warming could increments SOM mineralization and either altitudinal distribution range of *P. hartwegii* diminish the alpine soils capacity to sequester and storage SOC stocks. Therefore, this study showed that altitudinal gradients along a single forest cover enhance predictions of the responses SOC stocks to higher temperatures by the actual climate change.

**Key words:** Alpine forest, climate change, low temperature, soil organic matter, sand.



## 1. Introduction

Alpine forest soils contain high amounts of organic matter (SOM) (Dar and Sundarapandian, 2015; Shedayi *et al.*, 2016; Xiao *et al.*, 2014), which accounts for over 75 % of SOC (Shedayi *et al.*, 2016; Tian *et al.*, 2016; Tan *et al.*, 2004). High C content, coupled with lower temperature and less temperature variation at higher altitude, makes alpine forest soil an excellent sink of CO<sub>2</sub> (Tian *et al.*, 2016). This CO<sub>2</sub> pool is considered important to counteract the atmospheric accumulation of this greenhouse gas derived from global warming, which has exceeded 400 ppm in 2016 (NOAA, 2016; Cramer *et al.*, 2001).

Alpine ecosystems are considered among the most vulnerable ecosystems to climatic change. Yet, little is known about the consequences of climate change over tree species distribution in these ecosystems, and their capacity to store SOC (Jones *et al.*, 2009; Linder *et al.*, 2010). Regarding, if environmental conditions become more favorable to SOM decomposition in the future, as expected, alpine soils might become a CO<sub>2</sub> source rather than a sink (Laganière *et al.*, 2010; Vesterdal *et al.*, 2013). Since rising temperature enhances both C gains through net primary production, and respiratory C losses, the impact of soil warming on the C balance of alpine ecosystems become uncertain (Bohra *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2013). The effects of climatic conditions on tree growth and productivity depend upon the species (Dymond *et al.*, 2016; Alfaro-Ramírez *et al.*, 2017), so some of them may be better suited for C sequestration in the mineral soil as a more stable form (Bohra *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2016; Vesterdal *et al.*, 2013; Shedayi *et al.*, 2016). Thus, the interaction of many biotic and abiotic factors hampers evaluating the role of tree species on SOC stocks and how climatic change could alter this C pool along the altitudinal gradient. Even though some research has been done along altitudinal gradients in forests represented by different tree species (Bohra *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2013; Jobbágy and Jackson, 2000; Maraseni *et al.*, 2014), results have showed contrasting trends, including either negative (Bohra *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2013; Shedayi *et al.*, 2016; Sheikh *et al.*, 2009), positive (Du *et al.*, 2014; Tashi *et al.*, 2016), or no relationship (Zhu *et al.*, 2010; Tewksbury and Migroet, 2007; Zhang *et al.*, 2011), between SOC stocks and site elevation.

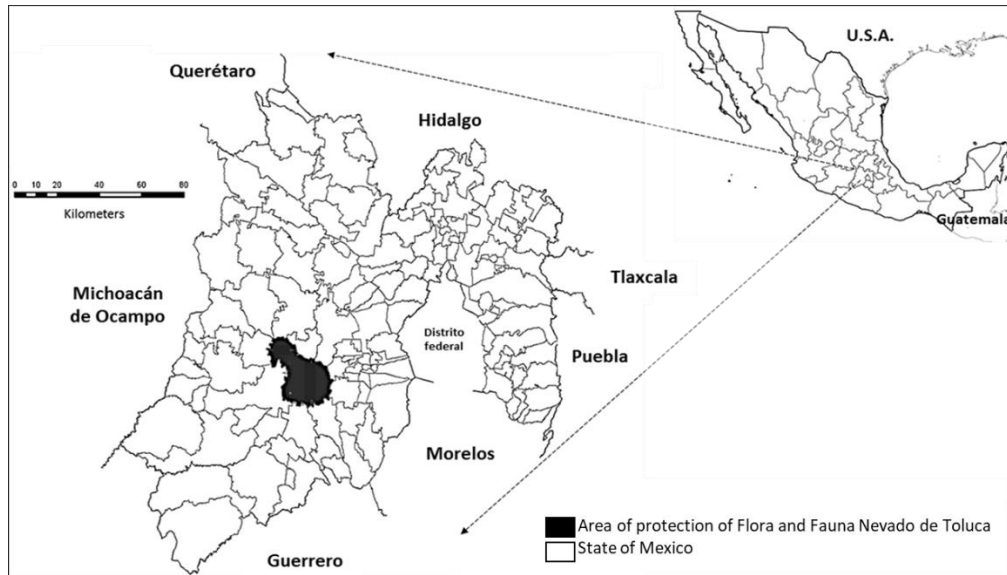
Alpine forest ecosystems are generally dominated by a single tree species, allowing to better evaluate the altitudinal trend in SOC stocks as related to the climatic gradient. Particularly important are tree species tightly adapted to low temperatures at high elevations, to evaluate the potential impact of climatic change on the large C pool that represent the alpine soils, and more so when there are concerns about the climatic C cycle feedback under

current global climate change. Regarding, *P. hartwegii* Lindl., represents an excellent opportunity, being the pine species growing at highest altitude (4 200 m) worldwide and adapted to extreme low temperatures of -30 °C (Körner and Paulsen, 2004; Perry, 1991). These growing conditions make it also one of the most vulnerable tree species to the projected temperature increase by climatic change models (Gómez-Mendoza and Arriaga, 2007), with implications on SOC stocks along the altitudinal gradient where the species is distributed. Therefore, is important to know the extent of change in SOC stocks along the altitudinal gradient and whether there is any trend in SOC stocks along the altitudinal gradient in *P. hartwegii* forest. The objectives of this study were to determine the SOC stocks along an altitudinal gradient (from 3 400 m to 4 000 m) in *P. hartwegii* forest and correlating these with soil chemical and physical characteristics. That, to increase the understanding about OC dynamics in alpine forest soils and enhance predictions of the responses of *P. hartwegii* and C pools in the face of climate change.

## 2. Methods

### 2.1. Site description

The study was carried out in the Flora and Fauna Protected Area (APFF) “Nevado de Toluca” located in central Mexico (19° 06’ 06” N 99° 46’ 03” W; Fig. 1); this zone has an altitudinal range from 3 000 m to 4 680 m (Körner and Paulsen, 2004). The predominant soil type is Andosol, in 90 % of the area, followed by feozem, regosol, cambisol and latosol (Körner and Paulsen, 2004). Climate is cold with an average annual temperature of -2 °C to 5 °C (García, 1990). The region has isothermal behavior and highest temperature occurs before summer solstice (Challenger and Soberón, 2008). Although rainfall can occur at any time of the year, rainy season runs from May to October, with July being the wettest month, and snowfall is common in winter. Annually, on average, 5.6 to 9.8 days of hail accumulate, mostly from May to October (Perry, 1991). Nevado de Toluca constitutes a relevant biogeographic area at a national level, since it is representative of several ecosystems that need to be preserved and restored, inside of it, there is an important altitudinal gradient dominated by *P. hartwegii* forest which is observed between 3 500 m and 4 000 m (Calderón de Rzedowski and Rzedowski, 2005; Challenger and Soberón, 2008).



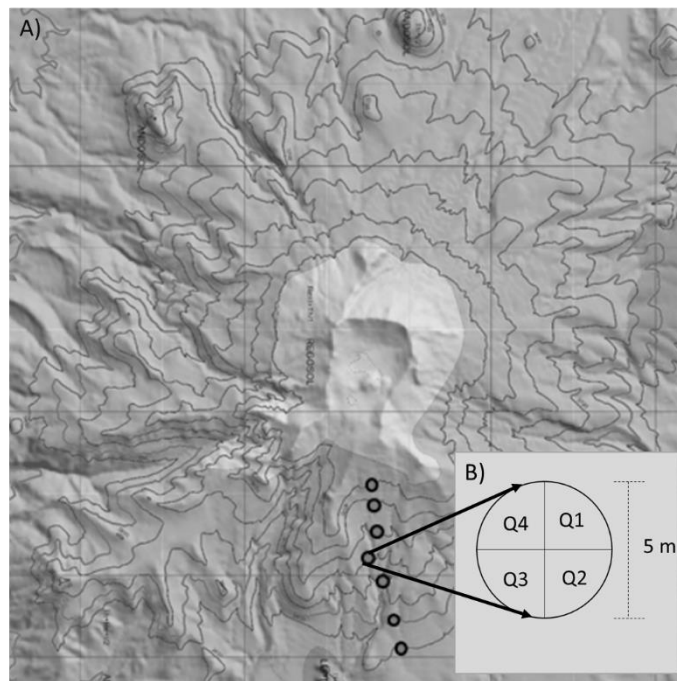
**Figure 1.** Location of the Flora and Fauna Protected Area “Nevado de Toluca” (Own elaboration).

## 2.2. *Species of study*

*Pinus hartwegii* Lindl., is a pine native to the mountains of Mexico and Central America. It grows in both mountain ranges: Sierra Madre Occidental and Sierra Madre Oriental (latitude 29 ° North) from the state of Chihuahua and Nuevo León (26 °) to the highest peaks in the mountains at El Salvador-Honduras border (latitude 15 ° North). It grows at altitudes from 3 400 m to 4 200 m, being the unique pine species reported at this high elevation (Campos, 1993). Physiognomically is an open community, with the arboreal stratum reaching 25 m to 35 m in height, but trees decreasing in height and diameter as they approach the upper altitudinal limit (Hernández *et al.*, 2005; Alfaro-Ramírez *et al.*, 2017). *Pinus hartwegii* forms a monospecific forest mass, with sporadic presence of individuals of other *Pinus* species and *Quercus*, *Arbutus* and *Juniperus*, particularly at the lower altitudinal limit (Camarero and Gutiérrez, 2004). This species is strongly adapted to extreme low temperatures (-30 °C) common in this alpine zone (Eguiluz, 1978; Perry, 1991), enduring the snowfall during the winter (Challenger and Soberón, 2008). Shifts in the altitudinal distribution of *P. hartwegii* in Izta-popo National Park (Beaman, 1962), Nevado de Toluca (Lauer, 1973) and Cofre de Perote (Iglesias and Tivo, 2006), associated with changes in local temperature, have been reported.

### 2.3. **Sampling design**

A randomized stratified sampling was carried out along an altitudinal gradient, with study sites located in the northeast aspect of the Nevado de Toluca volcano (Fig. 2A). The altitudinal gradient was set up from the lower limit of *P. hartwegii* distribution in the area (3 400 m) up to 4 000 m with sampling points every 100 m in elevation, making a total of seven altitudinal sampling levels. At each level, two diameter classes (20-30 cm and 40-50 cm) were used along the altitudinal gradient, 10 trees of *P. hartwegii* were selected. For each tree, the soil was divided making an imaginary circumference of 5 m in diameter and dividing it in four quadrants (Q1, Q2, Q3 y Q4; Fig. 2B). Subsequently, two soil samples were taken: Q1 and Q3 were sampled for odd trees, and Q2 and Q4 for even trees. Soil samples were extracted with PVC tubes 16 cm in length and 10 cm in diameter, introduced only 15 cm, on November 24 -28, 2016.



**Figure 2.** Sampling sites in the Protected Area of Flora and Fauna Nevado de Toluca along an altitudinal gradient on the northeast slope of the volcano every 100 m (A), and division of quadrants for soil removal (B).

#### **2.4. Soil analysis**

Soil samples were processed at the laboratory of the Institute of Agricultural and Rural Sciences belonging to the Autonomous University of the State of Mexico. Soil samples were dried outdoors for a week; then, rocks and the visible organic material were removed before grinding the soil sample. The ground floor was passed through a stainless-steel sieve with openings of 2 mm in diameter (mesh 10). SOC stocks and the relative values of SOC and SOM were estimated by the Walkley and Black (1934) method and soil texture by the Bouyoucos (1962) method. Subsequently, results were analyzed using the textural triangle of the United States Department of Agriculture (USDA, 2014). Soil bulk density (BD) of each sample was determined by the cylinder method. Soil pH was obtained by the potentiometer method (Sadzawka *et al.*, 2007) with an OAKTON pH / CON500 equipment previously calibrated with buffer solutions pH=4, pH=7 and pH=10, using a 1:2 solutions of KCl 1N.

#### **2.5. Statistical analyses**

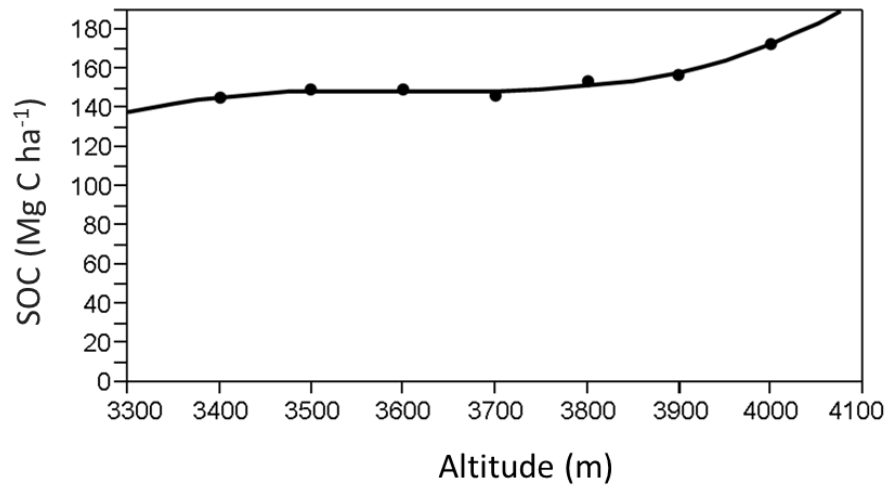
One-way ANOVA was performed to SOC, BD, pH, sand, clay, and silt data using the altitude as main factor. Previously, a normality test was carried out where, according to the Gaussian bell, each one of the variables had a normal behavior. Then, a quadratic regression was applied to all variables to predict behavior of data. To determine any potential relationship between SOC stocks and other soil properties (SOM, BD, pH, sand, clay and silt content) Pearson correlation coefficients were determined, and Principal Components Analysis (PCA) was carried out to perform a representation of the data in three dimensions establishing relationships between the variables and perceive their association or separation of the response variable (SOC). All statistical analyses were conducted using the SAS Statistical software (SAS Institute, Inc. 2002, 2003) and JMP release 8 (SAS Institute, Inc. 2008) with a confidence level of 95 %.

### **3. Results**

#### **3.1. Soil organic carbon stocks along the altitudinal gradient**

SOC stocks at 15 cm of depth along 600 m of altitudinal gradient, in the *P. hartwegii* forest at Nevado de Toluca showed a significant effect ( $p= 0.0176$ ) on altitude, with the highest value ( $173 \text{ Mg C ha}^{-1} \pm 5.2 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) at the highest site elevation (4 000 m), and the lowest ( $145.9 \text{ Mg C ha}^{-1} \pm 5.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) at 3 400 m. SOC stocks exhibited a positive relationship

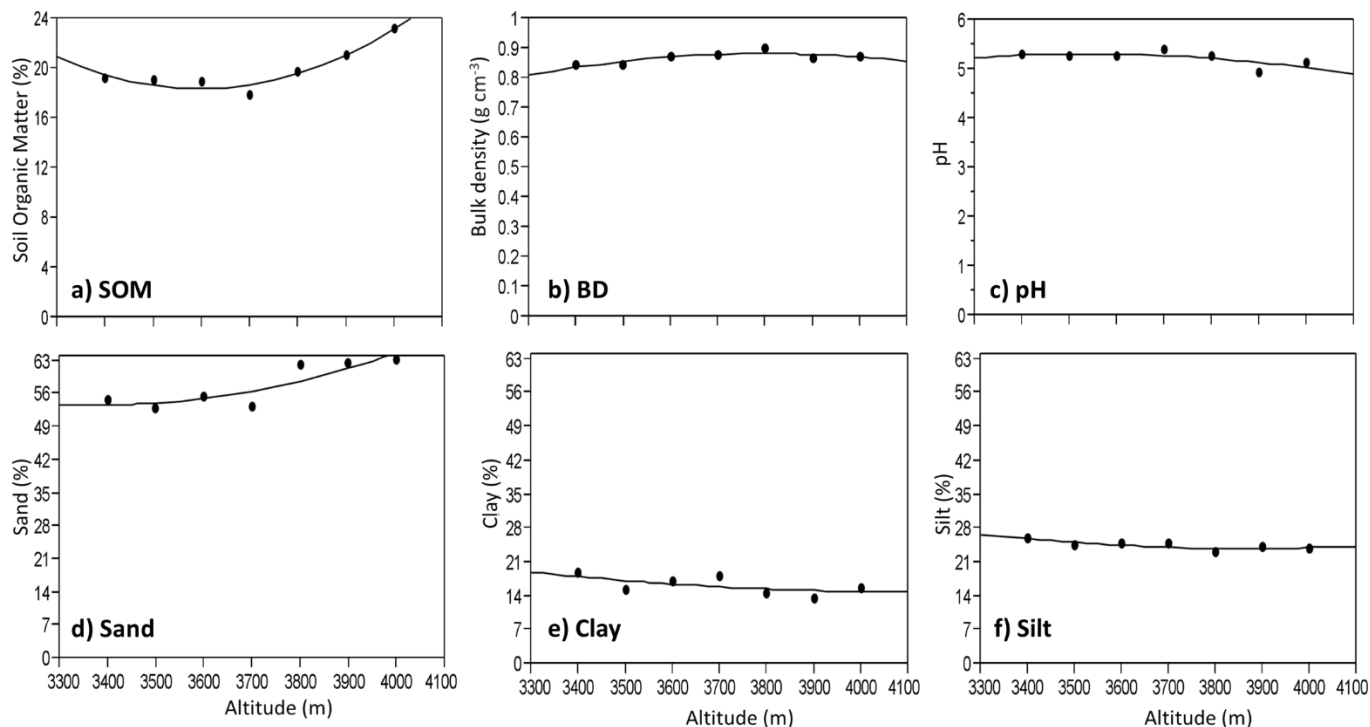
with elevation, displaying a quadratic regression ( $R^2= 0.9$ ; Fig. 3) which explains 90 % of the variability in SOC along the altitudinal gradient.



**Figure 3.** Soil organic carbon stocks along an altitudinal gradient of 600 m in the *P. hartwegii* forest at Nevado de Toluca.

### 3.2. **Soil properties along the altitudinal gradient**

SOM content at 15 cm of depth along the altitudinal gradient in *P. hartwegii* forest was significantly ( $p < 0.0001$ ) higher at 4 000 m ( $22.8 \% \pm 0.33 \%$ ; Fig. 4a), whereas the lowest SOM content was recorded at 3 700 m ( $19.1 \% \pm 0.26 \%$ ). Therefore, a positive trend of SOM accumulation was observed with altitude, adjusted to a quadratic regression, which explained 90 % ( $R^2= 0.9$ ) of the variability of SOM values.



**Figure 4.** SOM (a), BD (b), pH (c), sand (d), clay (e) and silt (f) along an altitudinal gradient of 600 m (3 400 m to 4 000 m) of *P. hartwegii* forest at Nevado de Toluca.

BD of the first 15 cm of soil in the *P. hartwegii* forest at Nevado de Toluca showed a continuous trend, increasing values with elevation (Fig. 4b), the lowest value obtained was at 3 400 m ( $0.84 \text{ g cm}^{-3} \pm 0.4 \text{ g cm}^{-3}$ ), and the highest value was at 3 800 m ( $0.90 \text{ g cm}^{-3} \pm 0.31 \text{ g cm}^{-3}$ ). BD adjusted model (quadratic regression) explained 70 % of the variability ( $R^2=0.7$ ;  $p < 0.0001$ ). Regarding soil pH along an altitudinal gradient of 600 m in *P. hartwegii* forest, there are significant differences ( $p=0.0001$ ; Fig. 4c) in the soil acidity across the altitudes with lowest pH at 3 900 m ( $4.9 \pm 0.56$ ), and the highest value ( $5.42 \pm 0.07$ ) at 3 700 m. The data were adjusted to quadratic regression model which explains 50 % of the variability in pH ( $R^2=0.5$ ).

Regarding texture, each particle size showed different behavior across the elevation gradient. Sand content increased with elevation, whereas silt and clay content followed the opposite trend. Sand recorded values were adjusted to quadratic regression, which explained 80 % of data variability ( $R^2=0.8$ ). Along the altitude, the One-way ANOVA showed a significant effect ( $p < 0.0001$ ). Sand showed an increment at the highest values i.e. 3 800

m ( $62.3 \% \pm 1.18 \%$ ; Fig. 4d), 3 900 m ( $62.5 \% \pm 1.22 \%$ ) and the maximum value is at 4 000 m ( $63.3 \% \pm 1.39 \%$ ), the lowest value was register at 3 500 m ( $53.1 \% \pm 0.70 \%$ ).

Clay showed in the One-way ANOVA a significant effect ( $p= 0.0018$ ). Regarding clay, its content was higher between 3 400 m and 3 700 m, with the highest content ( $18.7 \% \pm 0.74 \%$ ; Fig. 4e) at 3 400 m, and the lowest ( $13.7 \% \pm 0.97 \%$ ) at 3 900 m. Clay content also, (quadratic regression) presented a decrease as it rises in altitude. In the first sample sites at 3 400 m, a relative content of 17 % was observed and it remains constant up to 3 600 m, at the center of the gradient (3 700 m) there was 18.5 % increase in content and 4 000 m a decrease to 16 %. The adjusted model explains 40 % of the variability in clay ( $R^2= 0.4$ ).

Silt content display significant differences between altitudes ( $p< 0.0001$ ), where the altitude of 3 500 m has the highest content of silt ( $31.5 \% \pm 1.19 \%$ ; Fig. 4f) and lowest the upper site ( $21.0 \% \pm 1.39 \%$ ). Silt content along the altitudinal gradient behaved steadily, at all altitudes but in the 3 900 m there was a significant increase (72 %) and in the 4 000 m it descends to 69 %. The adjusted model (quadratic regression) explains 70 % of the variability in silt ( $R^2= 0.7$ ).

### **3.3. Relationships between SOC stock and soil characteristics**

Significant ( $p< 0.05$ ) positive correlations were found for SOC with SOM ( $r= 0.955$ ) and sand ( $r= 0.805$ ) (Table 1). Correlation between SOM and sand was also significant ( $r= 0.831$ ). Silt showed significant correlation with clay ( $r= 0.778$ ) and BD ( $r= -0.767$ ).



**Table 1.** Pearson correlation coefficient between physicochemical soil properties along an altitudinal gradient from 3 400 to 4 000 m of *P. hartwegii* forest at Nevado de Toluca.

	<b>SOC</b>	<b>SOM</b>	<b>BD</b>	<b>pH</b>	<b>Sand</b>	<b>Clay</b>	<b>Silt</b>
<b>SOC</b>	1.0000						
<b>SOM</b>	<b>0.9555*</b>	1.0000					
<b>BD</b>	0.2940	0.1025	1.0000				
<b>pH</b>	-0.5910	-0.7348	0.0786	1.0000			
<b>Sand</b>	<b>0.8054*</b>	<b>0.8310*</b>	0.5143	-0.7088	1.0000		
<b>Clay</b>	-0.4961	-0.5259	-0.2990	0.7381	-0.7058	1.0000	
<b>Silt</b>	-0.5326	-0.3936	<b>-0.7670*</b>	0.2845	-0.6750	<b>0.7784*</b>	1.0000

\*Correlation is significant at the 95 % confidence level

SOC: Soil Organic Carbon

SOM: Soil Organic Matter

BD: Bulk Density

PCA for these data showed that the first three components together explain 68 % of the variability in the original SOC data. The first component contributed with 30 % of the total variance in SOC, with SOM and sand contributing the most to this component (Table 2). The second component contributed 21 % of the total variance explained, including primarily the contribution of Clay and BD with opposite signs. Finally, silt and BD, with opposite signs, contributed the most to the third component, which only adds 17 % to the total variance.

**Table 2.** Matrix of principal components and eigenvalues of the original variables evaluated, the percentage of variance and the cumulative percentage to explain variation along the gradient.

	<b>Component 1</b>	<b>Component 2</b>	<b>Component 3</b>
<b>SOM</b>	0.4692	-0.2096	0.09813
<b>BD</b>	0.0237	0.5320	-0.5760
<b>pH</b>	-0.3759	0.2762	-0.3986
<b>Sand</b>	0.6381	0.2003	-0.1881
<b>Clay</b>	-0.3533	-0.5923	-0.3580
<b>Silt</b>	-0.3254	0.4534	0.5796
<b>Eigenvalue</b>	1.8029	1.2601	1.0269
<b>Percentage of variance</b>	30.0490	21.0020	17.1150
<b>Cumulative percentage</b>	30.0490	51.0520	68.1660

SOM: Soil Organic Matter

BD: Bulk Density

#### 4. Discussion

SOC represents a major C pool within the biosphere, leading to several studies on the quality, spatial distribution and behavior of SOC stocks. Under climatic change, alpine forests are considered highly sensitives to the temperature increasing, because of their tightly relationships with lows temperatures, increasing the expectation over OC storage in that ecosystems. In this study, SOC stocks were determined along an altitudinal gradient of *Pinus hartwegii* (3 400 m to 4 000 m) forest at Nevado de Toluca. This pine is distributed at the highest altitudes (until 4 200 m) than any other pine species across the world, providing an opportunity to deepen on the role of alpine tree species on storage C in the soil and, at

the same time, on the potential impact of global warming over the highest OC terrestrial pool, the soil.

SOC stocks, in *P. hartwegii* forest at Nevado de Toluca, exhibited a positive trend linked to site elevation (Fig. 3), with the higher SOC stock at the highest altitude site sampled (4 000 m). Similarly, Du *et al.* (2014) and Tashi *et al.* (2016) reported a significant higher SOC content as altitude increased. SOC stock variation were attributed to temperature reduction and precipitation increment with increasing altitude, emphasizing temperature as the main driving factor of SOC accumulation along the gradient. Lower temperatures influence vegetation composition and productivity modifying the SOM quantity and turnover (Quideau *et al.*, 2001; Sheikh *et al.*, 2009), with lower litter decomposition and higher SOC residence time in sites at higher altitude (Du *et al.*, 2014). Contrary to above, SOC stocks decreasing with increasing altitude has also been reported (Sheikh *et al.*, 2009; Bohra *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2013), or even no effects (Zhang *et al.*, 2011). Negatively trends on SOC stocks along altitude has been adjudicated to less litter accumulation, which represent lower input of OC into the soil, as well lower mineralization and net nitrification rates at higher altitudes. Additionally, plant community is one of the most important factors that influence SOC variation; further, interacting (confounding) effects due to interactions of vegetation and altitude with abiotic factors, resulting in different altitudinal trends in SOC stocks (Jobbágy and Jackson, 2000; Maraseni *et al.*, 2014).

SOC stocks recorded in this study in soil under *P. hartwegii*, showed a significant positive relationship with SOM and sand content (Table 1), both conformed the first component that explained 30 % of variation in SOC stocks, with a concomitant pattern across the altitudinal gradient (Table. 2). Litterfall produced by plants is the major source of OM, and then OC, to the soil. SOM behavior depend primarily to climate and other factors like vegetation type, altitude (Six and Jastrow, 2002), soil depth (Sheikh *et al.*, 2009; Bohra *et al.*, 2014; Parras-Alcantará *et al.*, 2015; Tashi *et al.*, 2016), and the mineral fractions (Tian *et al.*, 2016;), which influences the storage and mineralization of SOM. In the current study, sand increase significantly with altitude; while silt and clay fractions showed the opposite pattern to SOM (Feller and Beare, 1997). According the SOC decomposition model from Tian *et al.* (2016), mean annual temperature only influence the C labile pool size and not the stability; while the C pool tightly relate to sand is the intermediate pool, which contribute higher to accumulative C release from soil, i.e. to the higher CO<sub>2</sub> production from SOM decomposition. Further, higher SOC stock as ascending altitude at Nevado de Toluca, in this study, does not necessarily mean higher content of stable OC in the dominant Andosol

soils; in which; according to Covaleda *et al.* (2011), the higher OC stabilization is in the silt fraction, increasing the risk of OC losses (higher release of C-CO<sub>2</sub> to the atmosphere) in the case of environmental temperature increases as predicted at high altitudes (Jobbágy and Jackson, 2000).

Regarding the capacity of *P. hartwegii* forest soils to storage and sequestered OC, it is great compared to that reported in other studies related to SOC stocks in altitudinal gradients. To this study, the maximum SOC stock at 15 cm of depth were 173 Mg C ha<sup>-1</sup> at 3 400 m and 146 Mg C ha<sup>-1</sup> at 4 000 m; while Du *et al.* (2014) reported SOC stocks from 24.6 Mg C ha<sup>-1</sup> (219 m) to 69 Mg C ha<sup>-1</sup> (1 268 m) in an upper 10 cm in *Castanopsis sclerophylla* and *C. eyrei* deciduous tree. Tewksbury and Migroet (2007) reported SOC stocks at upper layer of 50 cm from 166 Mg C ha<sup>-1</sup> to 241 Mg C ha<sup>-1</sup> (1 835 m y 1 966 m of altitude, respectively). Regarding to other Pinus species, Sheikh *et al.* (2009) and Bohra *et al.* (2014) reported ranges of SOC stocks like the present study; *P. roxburghii*, for example, recorded SOC stocks from 137.6 Mg C ha<sup>-1</sup> (1 100 m-1 300 m) to 146 Mg C ha<sup>-1</sup> (700 m-900 m) at upper 20 cm layer at region of Kumaun Himalayas, in India. According to Monreal *et al.* (2005), in Mexico the temperate forest soils storage 327 Mg C ha<sup>-1</sup> on average, so SOC stocks recorded in this study represent 44 % and 53 % of the national mean in the lowest and highest altitudes, reflecting that *P. hartwegii*, the pine distributed at highest altitude in the world as an excellent way to sequester SOC in alpine soils, and might be regarded as major sinks of atmospheric CO<sub>2</sub>.

## 5. Conclusions

This study demonstrated that altitude had a significant effect on SOC stocks under *P. hartwegii*, and that its influence by soil organic matter, bulk density and the mineralogical fraction of soil, particularly sand content. Therefore, this work shows the influence of temperature (based on the altitudinal gradient) on SOC stocks additional to the effect of the species. Highest quantities of OC found at higher altitudes show the importance of *P. hartwegii* to sequester and store SOC at higher altitudes, therefore, if the climate changes, simulating the warmer climate is at the lower altitude, SOM decomposition and mineralization will be faster (higher CO<sub>2</sub> release) reducing SOC reserves in the higher mountains. In addition, to modifications on altitudinal distribution range of *P. hartwegii*, strictly adapted to low temperatures, due to a longer and warmer growing season. Resulting

in a potential change of SOC stock in alpine soils because of climate change, modified the C pool and sink of CO<sub>2</sub> that these ecosystems represents.

### **Acknowledgements**

The authors are grateful to CONACYT for the Master scholarship granted to LCA (No. 746226). To CEPANAF and CONANP for facilitating us the access to the Nevado de Toluca APFF. The present research work was funded by CONACYT-Basic Science No. 219696.

### **References**

- Alfaro-Ramírez, F.U., Pérez-Suárez, M., Arredondo-Moreno, J.T., Endara Agramont, A.R., 2017. *Pinus hartwegii* Lindl. treeline ecotone: structure and altitudinal limits at Nevado de Toluca, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 23, 261-273. doi: <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.10.055>
- Beaman, J.H., 1962. The timberlines of Iztaccíhuatl and Popocatepetl, Mexico. *Ecology*. 43, 377–385. doi:10.2307/1933367
- Bohra, C.S., Tewari, S.K., Bhatt, M.D., 2014. Trends in soil carbon stockpile of three major forest along an altitudinal gradient in Indian Central Himalaya. *ECOPRINT*. 21, 7-13. doi: <http://dx.doi.org/10.3126/eco.v21i0.11898>
- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, Madison, v.54, n.3, pp.464-465. doi:10.2134/agronj1962.00021962005400050028x
- Calderón de Rzedowski, G., Rzedowski, J., 2005. *Flora fanerogámica del Valle de México. Michoacán, México: INECOL-CONABIO.*
- Camarero, J.J., Gutiérrez, E., 2004. Pace and pattern of recent treeline dynamics: Response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees. *Climatic Change*. 63, 181–200. doi: 10.1023/B:CLIM.0000018507.71343.46
- Campos, J.L., 1993. *Claves para la determinación de los pinos mexicanos. Universidad Autónoma Chapingo, México pp. 22-70.*
- Challenger, A., Soberón, J., 2008. Los ecosistemas terrestres. En *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (Eds.), Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad, pp. 87–108. México: CONABIO.*

- Covaleda, S., Gallardo, J.F., García-Oliva, F., Kirchmann, H., Prat, C., Bravo, M., Etchevers, J.D., 2011. Land-use effects on the distribution of soil organic carbon within particle-size fractions of volcanic soils in the Transmexican Volcanic Belt (Mexico). *Soil use and Management*. 27, 186-194.
- Cramer, W., Bondeau, A., Woodward, F.I., Prentice, C., Betts, R.A., Brovkin, V., Cox, P.M., Fisher, V., Foley, J., Friend, A., Kucharik, C., Lomas, M.R., Ramankutty, N., Sitch, S., Smith, B., White, A., Young-Molling, C., 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO<sub>2</sub> and climate change: results from six Dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*. 7, 357-373. doi: 10.1046/j.1365-2486.2001.00383.x
- Dar, J.A., Sundarapandian, S., 2015. Variation of biomass and carbon pools with forest type in temperate forests of Kashmir Himalaya, India. *Environmental Monitoring and Assessment*. 187, 1–17. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4299-7>
- Du, B., Kang, H., Pumpanen, J., Zhu, P., Yin, S., Zou, Q., Wang, Z., Kong, F., Liu, C., 2014. Soil organic carbon stock and chemical composition along an altitude gradient in the Lushan Mountain, subtropical China. *Ecological research*. 29, 433-439.
- Dymond, C.C., Beukema, S., Nitschke, C.R., Coates, D.K., Scheller, R.M., 2016. Carbon sequestration in managed temperate coniferous forests under climate change. *Biogeosciences*. 13, 1933-1947. doi: <https://doi.org/10.5194/bg-13-1933-2016>
- Eguiluz, T., 1978. Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género *Pinus* en México. Tesis de licenciatura (Ing. Agr.). Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, México. pp. 623.
- Feller, C., Beare, M.H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*. 79, 69-116.
- García, E., 1990. Carta de climas, Atlas Nacional de México. México: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Gómez-Mendoza, L., Arriaga, L., 2007. Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pine species of Mexico. *Conservation Biology*. 21, 1545-1555. doi: 10.1111/j.1523-1739.2007.00814.x.
- Hernández, A.J.C., Gutiérrez, G.G., Almeida, L.L., Ordóñez, D.J.A.B., 2005. Análisis dendroclimático de *Pinus hartwegii* en el volcán nevado de Toluca. México. I Simposio Ecología, manejo y conservación de los ecosistemas de montaña en México. Memorias. Laboratorio de Biotecnología y Ecología Aplicada. LABIOTECA. Xalapa, Veracruz, México. Noviembre 17 y 18, 2005. pp: 102-103.

- Iglesias, A.L.G., Tivo, F. Y., 2006. Caracterización morfométrica de la población de *Pinus hartwegii* Lindl. del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Ra Ximhai*. 2, 449–468. [Acceded: January 18 2018] Available at: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46120208>> ISSN 1665-0441
- Jobbágy, E., Jackson, R., 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*. 10, 423-436.
- Jones, M.C., Peteet, D.M., Kurdyla, D., Guilderson, T., 2009. Climate and vegetation history from a 14 000-year peatland record, Kenai Peninsula, Alaska. *Quaternary Research*. 72, 207-217. doi: <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.04.002>
- Körner, C., Paulsen, J., 2004. A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*. 31,713-732. doi: 10.1111/j.1365-2699.2003.01043.x
- Kumar, P., Chandra, P.P., Singh, B.K., Katiyar, S., Mandal, V.P., Rani, M., Tomar, V., Patairiya, S., 2016. Estimation of accumulated soil organic carbon stock in tropical forest using geospatial strategy. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 19, 109-123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.12.003>
- Kumar, S., Lal, R., Lloyd, C.D., 2013. Assessing spatial variability in soil characteristics with geographically weighted principal components analysis. *Computational Geosciences*. 16, 827-835. doi: 10.1007/s10596-012-9290-6
- Laganière, J., Angers, D.A., Paré, D., 2010. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biology*. 16, 439–453. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.01930.x
- Lauer, W., 1973. The altitudinal belts of the vegetation in the central Mexican highlands and their climatic conditions. *Arctic and Alpine Research*. 5, A99–A113.
- Linder, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., García-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolstrom, M., Lexer, M. J., Marchetti, M., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*. 259, 698-709. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
- Maraseni, T.N., Pandey, S.S., 2014. Can vegetation types work as an indicator of soil organic carbon? An inside from native vegetation in Nepal. *Ecological indicators*. 46, 315-322.
- Monreal, C.M., Etchevers, J.D., Acosta, M., Hidalgo, C., Padilla, J., López, R.M., Jiménez, L., Velázquez, A., 2005. A method for measuring above-and below- ground C stocks in hillside landscapes. *Canadian Journal of Soil Science*. 85, 523-530.

- National Oceanic and Atmospheric Administration, 2016. Atmospheric CO<sub>2</sub> at Mauna Loa Observatory. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends7full.html/> (accessed September 18, 2017).
- Parras-Alcántara, L., Lozano-García, B., Galán-Espejo, A., 2015. Soil organic carbon along an altitudinal gradient in the Despeñaderos Natural Park, southern Spain. *Solid Earth*. 6, 125-134.
- Perry, J.P., 1991. *The pines of Mexico and central America*. Portland, OR: Timber Press. Portland, Oregon, E.U.A. pp. 137-140.
- Quideau, S., Chadwick, O.A., James, B.A., Anderson, M.A., 2001. A direct link between forest vegetation type and soil organic matter composition. *Geoderma*. 104, 41-60.
- Rzedowski, J., 1998. Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. En: Ramamoorthy T.P., Bye R., Lot A. y Fa J. Comp. *Diversidad Biológica de México: Orígenes y Distribución*, pp. 129-145, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Sadzawka, A., Grez, R., Carrasco, M., Mora, M., 2007. *Métodos de análisis de tejidos vegetales*. Santiago. Chile. Comisión de Normalización y Acreditación Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo pp. 53.
- SAS Institute Inc., 2002, 2003. *SAS® Web Report Studio 4.2; User's Guide*, Cary, NC; SAS Institute Inc. pp 5136.
- Shedayi, A.A., Xu, M., Naseer, I., Khan, B., 2016. Altitudinal gradients of soil and vegetation carbon and nitrogen in a high-altitude nature reserve of Karakoram ranges. *Springer Plus*. 5, 320. doi: <https://doi.org/10.1186/s40064-016-1935-9>
- Sheikh, A.M., Kumar, M., Bussman, R., 2009. Altitudinal variation in soil organic carbon Stock in coniferous Subtropical and broadleaf temperate forests in Garhwal Himalaya. *Carbon Balance Management*. 4, 1 – 6.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R., 1993. *Volcanic ash soils. Genesis. Properties and utilization*. *Developments in Soil Science*. 21. Amsterdam. Elsevier, 288 p.
- Six, J., Jastrow, J.D., 2002. Organic Matter Turnover. In: R: Lal, Ed., *Encyclopedia of Soil Science*, Marcel Dekker, New York, pp. 936-942.
- Tan, Z.X., Lal, R., Smeck, N.E., Calhoun, F.G., 2004. Relationships between surface soil organic carbon pool and site variables. *Geoderma*. 21, 185-187.
- Tashi, S., Singh, B., Keitel, C., Adams, M., 2016. Soil carbon and nitrogen stocks in forest along an altitudinal gradient in the Easter Himalayas and a meta-analysis of global data. *Global Change Biology*. 22, 2255-2268.



- Tewksbury, C.E., Migroet, H.V., 2007. Soil organic carbon dynamics along a climatic gradient in a southern Appalachian spruce-fir forest. *Canadian Journal for Research*. 37, 1161-1172.
- Tian, Q., He, H., Cheng, W., Bai, Z., Wang, Y., Zhang, X., 2016. Factors controlling soil organic carbon stability along a temperate forest altitudinal gradient. *Nature scientific reports*. 6, 18783. doi: 10.1038/srep18783
- USDA (United States Department of Agriculture)., 2014. Soil Survey Staff. 12° ed. US-Environmental Protection Agency, Washington. pp. 140.
- Vesterdal, L., Clarke, N., Sigurdsson, B.D., Gudersen, P., 2013. Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? *Forest Ecology Management*. 309, 4-18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.01.017>
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37, 29-37.
- Xiao, Y, Kai, A., Yang, Y, Xie, G., Lu, C., 2014. Forest Carbon Storage Trends Along Altitudinal Gradients in Beijing, China. *Journal of Resources and Ecology*. 5, 148-156. doi: <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764X.2014.02.007>
- Zhang, M., Zhang, X., Liang W., Jiang, Y., Dai, G., Wang, X., Han, S., 2011. Distribution of soil organic carbon fractions along the altitudinal gradient in Changbai Mountain, China. *Pedosphere*. 5, 615-620.
- Zhu, B., Wang, X., Fang, J., 2010. Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt Changbai, Northeast China. *Journal of Plant Research*. 123, 439-452. doi: 10.1007/s10265-

Elsevier Editorial System(tm) for Catena  
Manuscript Draft

Manuscript Number:

Title: Soil organic carbon stocks in *Pinus hartwegii* Lindl., along an altitudinal gradient from 3400 to 4000 m at Central Mexico

Article Type: Research Paper

Keywords: Alpine forest, climate change, low temperature, soil organic matter, sand.

Corresponding Author: Dr. MARLIN PEREZ, Dr.

Corresponding Author's Institution: Autonomous University of Mexico State

First Author: Lizbeth Carrillo-Arizmendi, PhD

Order of Authors: Lizbeth Carrillo-Arizmendi, PhD; MARLIN PEREZ, Dr.; J. Jesus Vargas-Hernández, PhD; Angel Rolando Endara-Agramont; Philippe Rozenberg

Abstract: The fact that forest soils store 40 percent of the organic carbon (OC) present in the earth surface highlights the great capacity of tree species to capture and transfer C to the soil. *Pinus hartwegii* Lindl., is the pine species located at highest altitude (4 200 m) in the world, and at the same time one of the species that is expected to respond through altitudinal migration to increases in environmental temperature. Nevertheless, low is known about their capacity to storage soil organic carbon (SOC) and less how C in the soil pool could be affected by the climatic change. Therefore, in this research the effect of altitude on the SOC stocks was determined from 3 400 m to 4 000 m in a *P. hartwegii* forest, located at the Nevado de Toluca volcano. SOC stocks were determined in soil samples collected every 100 m in elevation. Results displayed that SOC stocks (15 cm deep) were 173.1 Mg ha<sup>-1</sup> significantly higher at the highest altitude site (4 000 m) than at the lowest altitude 146.8 Mg ha<sup>-1</sup> (3 400 m), showing a clear ascending SOC stocks patterns as the altitude increases. This indicate lowest SOC stocks in site with highest temperatures (lower altitude), confirming that the environment temperature increases due to global warming could increments SOM mineralization and either altitudinal distribution range of *P. hartwegii* diminish the alpine soils capacity to sequester and storage SOC stocks. Therefore, this study showed that altitudinal gradients along a single forest cover enhance predictions of the responses SOC stocks to higher temperatures by the actual climate change.

Suggested Reviewers: Esteban Gabriel Jobbágy PhD  
CONICET and Universidad Nacional de San Luis, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas  
jobbagy@gmail.com

This researcher has a solid knowledge about the impact of tree species over soil organic carbon under context of climatic change.

Robert B. Jackson PhD  
Botany, Duke University  
jackson@duke.edu

He has several papers about the soil organic drivers, including the tree species.

Ian Cristofer Burke PhD  
Ecology, Colorado State University  
icburke@wsu.edu

Has great experience development research about the impact of altitude and vegetative cover on soil organic carbon.

20/3/2018

Gmail - Acknowledgement of receipt of your submitted article



mape su <marpersua@gmail.com>

---

## Acknowledgement of receipt of your submitted article

---

**Catena** <eesserver@eesmail.elsevier.com>  
Responder a: Catena <catena-ee@elsevier.com>  
Para: marpersua@gmail.com, mperezs@uaemex.mx

20 de febrero de 2018, 19:00

Article Type: Research Paper.

Dear Dr. PEREZ,

Your submission entitled "Soil organic carbon stocks in Pinus hartwegii Lindl., along an altitudinal gradient from 3400 to 4000 m at Central Mexico" has been received by Catena. This will soon be assigned to an editor. You will be able to check on the progress of your paper by logging on to <https://ees.elsevier.com/catena/> as Author.

Your manuscript will be given a reference number in due course.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Catena

<https://mail.google.com/mail/u/0/?ui=2&ik=be66a21ff2&jsver=D2N7-kpSDXM.es.&view=pt&msg=161b5e0363d649bc&q=catena&qs=true&search=quer...> 1/1

## IX. DISCUSIÓN GENERAL

Conocer de que manera el impacto de las condiciones abióticas (temperatura, precipitación, suelo, etc.) sobre la formación de madera y sobre todo las características del anillo por especie principalmente las establecidas a lo largo de gradientes altitudinales (Premoli y Mathiasen, 2011) fue de gran utilidad para entender y predecir la respuesta de un ecosistema forestal al cambio climático y poder determinar patrones de crecimiento arbóreo a lo largo de gradientes altitudinales, por su importancia como potentes experimentos naturales para los cuales prueban respuestas ecológicas y evolutivas de la biota sobre todo cuando las temperaturas son muy bajas. Se pudo notar que a medida que se incrementa la altitud, las temperaturas disminuyen lo cual redujo las tasas de descomposición y por tanto las salidas de CO<sub>2</sub> del ecosistema forestal, sin embargo, a diferencia de lo mencionado por Ohtsuka *et al.*, (2008) que a menores altitudes se verá reflejado una disminución en el crecimiento y producción de biomasa donde dominan las formas de vida arbórea a formas de vida con menores requerimientos ecológicos, en este trabajo a medida que incremento la altitud, la producción de biomasa fue mayor al igual que los contenidos de COS.

Por otro lado, bajo el contexto del cambio climático, debido a la preocupación existente se desconocen los impactos que el incremento de temperaturas tendrá sobre los reservorios tanto aéreos como subterráneos de C de los ecosistemas forestales alpinos, los cuales podrían convertirse en una gran fuente de CO<sub>2</sub> en lugar de un sumidero, además los patrones de crecimiento arbóreo se verán afectados, en este caso *P. hartwegii* y sus características de cada uno de sus anillos y como se llevó a cabo en este estudio, sus características que se verán altamente influenciadas por las condiciones climáticas extremas derivadas del cambio climático son la amplitud del anillo y la densidad, esta última es de suma importancia para poder determinar la biomasa producida a lo largo de un gradiente altitudinal debido a que se han observado cambios en la dimensión de los anillos de crecimiento así como en la estructura celular de algunas especies arbóreas conforme se incrementa la altitud (Morey, 1977), determinar la biomasa es con la finalidad de poder estimar la cantidad de C que el bosque acumulará como parte de la mitigación del cambio climático (Brown *et al.*, 1996). En este sentido, en el presente estudio se pudo observar mediante la combinación de la dendrocronología y la densitometría de rayos X que existe poca variabilidad en el crecimiento en cuanto a la producción de biomasa (Resultados VIII.1, pag.37, Fig.2c) al inicio del gradiente altitudinal (3 400 m) analizado, en esa misma altitud el COS estuvo presente en menor cantidad comparado con los almacenes encontrados a

mayores altitudes (Resultados VIII.2, pag.58, Fig.3), en el centro del gradiente (3 700 m) tanto los reservorios de COS como en la producción de biomasa se observa una disminución, siendo esto contrastante con el resto de las altitudes, a los 4 000 m es decir, en el punto máximo del gradiente estudiado se puede apreciar una acumulación mayor de COS y de producción de biomasa, en este sentido, se puede decir que existe una relación entre ambos resultados encontrados, además de que la variación de los reservorios de COS fue atribuida a la disminución en la temperatura y al incremento de la precipitación con el aumento de la altitud, haciendo hincapié en la temperatura como el principal factor impulsor de la acumulación de COS a lo largo del gradiente, esto se puede corroborar mediante estudios realizados en donde mencionan que las temperaturas más bajas influyen en la composición y productividad de la vegetación modificando la cantidad y volumen de MOS (Quideau *et al.*, 2001; Sheikh *et al.*, 2009), con menor descomposición de la hojarasca y mayor tiempo de residencia COS en sitios a mayor altitud (Du *et al.*, 2014 ). En cuanto a la biomasa reportada para este estudio, de acuerdo con Yang *et al.* (2013), se dice que no existe un control contrastante del crecimiento de los árboles ubicados a baja y gran altura; además del crecimiento interanual de los árboles ubicados en la parte superior de la distribución altitudinal siendo este considerado como el resultado del estrés generado por las condiciones de aridez en los sitios de muestreo, lo que se pudo corroborar en este estudio ya que el índice de aridez tuvo influencia en la amplitud del anillo, la densidad y la biomasa controlados por la precipitación y sobre todo por la temperatura. Las entradas y salidas de C en un ecosistema forestal son de gran importancia en cuanto a la contribución para mitigar el cambio climático, este estudio se pudo corroborar con la biomasa producida que se incrementa en la mayor altitud del gradiente y que coincide con la cantidad de reservas de COS encontradas en esa altitud afirmando la excelente capacidad que tienen los bosques de *P. hartwegii* para almacenar y secuestrar COS, en comparación con lo informado en otros estudios relacionados con las poblaciones de COS en gradientes altitudinales y de esta manera entender el papel crucial que juega esta especie en relación a la mitigación del cambio climático. En este sentido el presente trabajo aprueba la hipótesis planteada ya que tanto la biomasa como el COS se relacionan directamente con la temperatura e influye en los flujos de C lo cual a su vez incide en el crecimiento radial de *P. hartwegii*. Con base en esto, el presente trabajo de investigación se convierte en pionero en México en su tipo y provee información importante para profundizar en el conocimiento sobre la dinámica de C en estos ecosistemas y el impacto potencial del calentamiento global sobre los ecosistemas forestales de alta montaña. Con ello se requiere de generar estudios

en donde se pueda determinar a detalle las características interanuales relacionadas con la influencia de la temperatura y precipitación asociadas a las formas de vida arbóreas que se establecen por arriba de su límite de distribución altitudinal.

## X. CONCLUSIONES GENERALES

El ancho del anillo, la densidad del anillo y la biomasa no muestran un patrón similar a lo largo del gradiente altitudinal, sin embargo, el ancho del anillo y la biomasa coinciden en el patrón ya que los puntos de mayor acumulación en ambos se encontraron en el extremo máximo, es decir, a 4 000 m y el más bajo se encontró a 3 400 m del gradiente. El ancho del anillo en la estación NT se define por el índice de aridez, pero a una temperatura más alta, mientras que la densidad del anillo en la misma estación meteorológica se define de la misma manera por el índice de aridez, pero basado en la precipitación, es el mismo caso para la biomasa ya que en esta misma estación se define por la precipitación. Para el caso de las variables climáticas provenientes de la estación de TV, el ancho del anillo está relacionado con el índice de aridez basado en la precipitación, la densidad se relaciona de la misma manera con el índice de aridez, pero en este caso, la temperatura es quien la define. La biomasa coincide de la misma manera con el índice de aridez, pero en función de las temperaturas. Con esto podemos demostrar que el ancho del anillo es mayor a medida que la precipitación es mayor y la densidad se define por la temperatura, cuanto mayor es la temperatura, mayor es la densidad del anillo. Por otro lado, la altitud tiene un efecto significativo sobre los almacenes de COS bajo *P. hartwegii*, por la influencia de la MOS, la densidad aparente y la fracción mineralógica del suelo, particularmente el contenido de arena. En este sentido, este trabajo muestra la influencia de la temperatura (basada en el gradiente altitudinal) en las reservas de COS adicionales al efecto de la especie. Las mayores cantidades de COS encontradas en altitudes más altas muestran la importancia de *P. hartwegii* para almacenarlo en altitudes más altas, por lo tanto, si el clima cambia, simulando que es más cálido, la descomposición y mineralización de MOS será más rápida (mayor liberación de CO<sub>2</sub>) reduciendo las reservas de COS. Además, de las modificaciones en el rango de distribución altitudinal de *P. hartwegii*, estrictamente adaptado a las bajas temperaturas, se genera una estación de crecimiento más larga y más cálida. Como resultado de un posible cambio de las existencias de COS en los suelos alpinos debido al cambio climático, se modificó en conjunto el C y el sumidero de CO<sub>2</sub> que estos ecosistemas representan.

Dado que la producción de biomasa vegetal depende directamente de la temperatura y está directamente relacionada con la cantidad de C que entra al suelo, los almacenes de COS coincidirán con el crecimiento radial de *P. hartwegii* a lo largo del gradiente altitudinal en el Nevado de Toluca. Los resultados sugieren que la temperatura



por sí sola no influyó en el crecimiento de *P. hartwegii*, pero sí la interacción entre la temperatura y la precipitación. Por tanto, la temperatura es un factor que podría influir en el tamaño de los reservorios de COS, por lo que es importante ahondar más en los mecanismos que controlan la incorporación y permanencia de COS en la MOS. Los resultados de este trabajo contribuyen en gran medida a la comprensión de la influencia de las variables climáticas en la captura y almacenamiento de C aéreo y subterráneo en los bosques de alta montaña de *P. hartwegii*, así como en el impacto potencial del cambio climático en los bosques como reservorios de C y mitigador del cambio climático global.

## XI. Referencias

- Aitken, S.N., Yeaman, S., Holliday, J.A., Wang, T., Curtis-McLane, S., 2007. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*. 1, 95-111.
- Alfaro-Ramírez, F.U., Pérez-Suárez, M., Arredondo-Moreno, J.T., Endara Agramont, A.R., 2017. *Pinus hartwegii* Lindl. treeline ecotone: structure and altitudinal limits at Nevado de Toluca, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 23, 261-273. doi: <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.10.055>
- Astudillo-Sánchez C., Villanueva-Díaz J., Endara-Agramont A., Nava-Bernal G., Gómez-Albores M. 2016. Climatic variability at the treeline of Monte TLALOC, México: a dendrochronological approach. *Trees*, 1-13 pp.
- Beaman, J.H., 1962. The timberlines of Iztaccíhuatl and Popocatepetl, Mexico. *Ecology*. 43, 377-385. doi:10.2307/1933367
- Bohra, C.S., Tewari, S.K., Bhatt, M.D., 2014. Trends in soil carbon stockpile of three major forest along an altitudinal gradient in Indian Central Himalaya. *ECOPRINT*. 21, 7-13. doi: <http://dx.doi.org/10.3126/eco.v21i0.11898>
- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, Madison, v.54, n.3, pp.464-465. doi:10.2134/agronj1962.00021962005400050028x
- Brown, S., Gillespe J.R.A., Lugo, A.E., 1989. Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science*. 35, 881-902.
- Calderón de Rzedowski, G., Rzedowski, J., 2005. Flora fanerogámica del Valle de México. Michoacán, México: INECOL-CONABIO.

- Camarero, J.J., Gutiérrez, E., 2004. Pace and pattern of recent treeline dynamics: Response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees. *Climatic Change*. 63, 181–200. doi: 10.1023/B:CLIM.0000018507.71343.46
- Campos, J.L., 1993. Claves para la determinación de los pinos mexicanos. Universidad Autónoma Chapingo, México pp. 22-70.
- Challenger, A., Soberón, J., 2008. Los ecosistemas terrestres. En Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (Eds.), *Capital natural de México*, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad, pp. 87–108. México: CONABIO.
- 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, 849–862.
- Dixon, R.K.K., Solomon, A.M., Brown, S., Wisniewski, J., 1994. Carbon pools and fluxes of global forest ecosystems. *Science*. 263, 185-190.
- Du, B., Kang, H., Pumpanen, J., Zhu, P., Yin, S., Zou, Q., Wang, Z., Kong, F., Liu, C., 2014. Soil organic carbon stock and chemical composition along an altitude gradient in the Lushan Mountain, subtropical China. *Ecological research*. 29, 433-439.
- Eguiluz, T., 1978. Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género *Pinus* en México. Tesis de licenciatura (Ing. Agr.). Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, México. pp. 623.
- FAO, 2000. Emissions scenarios. Intergovernmental panel on climate change. [En línea] Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/005/ac836e/AC836E09.htm#TopOfPage> . (Consultado el 1 de marzo de 2018).
- FAO, 2001. Forests and climate change. Carbon and the Greenhouse effect. [En línea] Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/005/ac836e/AC836E03.htm#TopOfPage> (Consultado el 2 de marzo de 2018).
- García-Fernández, A., 2011. Cambio climático en alta montaña: una perspectiva genética. *Ecosistemas*. 20, 129-132.
- García, E., 1990. Carta de climas, Atlas Nacional de México. México: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

- Giménez-Benavides, L., Escudero, A., Iriondo, J.M., 2007. Reproductive limits of a late-flowering high-mountain Mediterranean plant along an elevational climate gradient. *New Phytologist*. 173, 367-382.
- Gracia, C. 2005. *Ecología Forestal: Estructura, Funcionamiento y Producción de las masas forestales*. [En línea] Disponible en: [http://www.ub.edu/ecologia/carlos.gracia/PublicacionesPDF/La\\_madera.pdf](http://www.ub.edu/ecologia/carlos.gracia/PublicacionesPDF/La_madera.pdf) (Consultado el 27 de febrero de 2018).
- Goldblum, D., 2010. The geography of white oak's (*Quercus alba* L.) response to climatic variables in North America and speculation on its sensitivity to climate change across its range. *Dendrochronologia*. 28, 73–83.
- Gonzalez-Rosales, A., Rodriguez-Trejo, D.A., 2004. Effect of crown scorch on diameter growth of *Pinus hartwegii* Lindl. at the Distrito Federal, Mexico. *Agrociencia*. 38, 537-544.
- Hernández, A.J.C., Gutiérrez, G.G., Almeida, L.L., Ordóñez, D.J.A.B., 2005. Análisis dendroclimático de *Pinus hartwegii* en el volcán nevado de Toluca. México. I Simposio Ecología, manejo y conservación de los ecosistemas de montaña en México. *Memorias*.
- Hughes, M., 2002. Dendrochronology in climatology the state of the art. *Dendrochronologia*. 20, 95–116.
- Iglesias, A.L.G., Tivo, F. Y., 2006. Caracterización morfométrica de la población de *Pinus hartwegii* Lindl. del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Ra Ximhai*. 2, 449–468. [Acceded: January 18 2018] Available at: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46120208>> ISSN 1665-0441
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of Working Group I* (eds, Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguier, M., van der Linden, P.J. y Xiaosu, D.). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jobbágy, E., Jackson, R., 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*. 10, 423-436.
- Jones, M.C., Peteet, D.M., Kurdyla, D., Guilderson, T., 2009. Climate and vegetation history from a 14 000-year peatland record, Kenai Peninsula, Alaska. *Quaternary Research*. 72, 207-217. doi: <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.04.002>.
- Kapos, V., Rhind, J., Edwards, M., Ravilious, C., Prince, M.F., 2000. Developing a map of the world's mountain forests. In: Price M.F. y Butt, N. (Eds.). *Forests in*

- sustainable mountain development: A state-of- knowledge report for 2000. CAB International, Wallingford, UK 4-9.
- King, G., Gugerli, F., Fonti, P., Frank, D., 2013. Tree growth response along an elevational gradient: climate or genetics? *Oecologia*, 173, 1587-1600.
- Körner, C. 2007. The use of altitude in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution*. 22, 569-74.
- Körner, C., Paulsen, J., 2004. A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*. 31,713-732. doi: 10.1111/j.1365-2699.2003.01043.x
- Kumar, P., Chandra, P.P., Singh, B.K., Katiyar, S., Mandal, V.P., Rani, M., Tomar, V., Patairiya, S., 2016. Estimation of accumulated soil organic carbon stock in tropical forest using geospatial strategy. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 19, 109-123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.12.003>
- Lauer, W., 1973. The altitudinal belts of the vegetation in the central Mexican highlands and their climatic conditions. *Arctic and Alpine Research*. 5, A99–A113.
- Linder, M. Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., García-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolstrom, M, Lexer, M. J., Marchetti, M., 2010. Climate change impacts, adaptative capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*. 259, 698-709. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
- Morey, P., 1977. Como crecen los árboles. *Omega* (ed.) 72p.
- NOAA, 2017. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Recent Monthly Average Mauna Loa CO<sub>2</sub>. [En línea] Disponible en: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html> (Consultado el 28 de febrero de 2018).
- Nogués-Bravo, D., Araújo, M.B., Lasanta, T., López Moreno, J.L., 2008. Climate change in Mediterranean mountains during the XXI st century. *Ambio*. 37, 380-385.
- Ohtsuka, T., Hirota, M., Zhang, X., Tang, Y., 2008. Soil organic carbon pools in alpine ti nival zones along an altitudinal gradient (4 400- 5 300 m) on the Tibetan Plateau. *Polar Science*. 2, 277-285.
- Perry, J.P., 1991. *The pines of Mexico and central America*. Portland, OR: Timber Press. Portland, Oregon, E.U.A. pp. 137-140.
- Premoli, A., Mathiasen, P., 2011. Respuestas ecofisiológicas adaptativas y plásticas en ambientes secos de montaña: *Nothofagus pumilio*, el árbol que acaparó los Andes australes. *Ecología Austral*. 21, 251-269.

- Qian, H., Joseph, R., Zeng, N., 2010. Enhanced terrestrial carbon uptake in the Northern High Latitudes in the 21st century from the Coupled Carbon Cycle Climate Model Intercomparison Project model projections *Global Change Biology*. 16, 641–56.
- Quideau, S., Chadwick, O.A., James, B.A., Anderson, M.A., 2001. A direct link between forest vegetation type and soil organic matter composition. *Geoderma*. 104, 41-60.
- Sadzawka, A., Grez, R., Carrasco, M., Mora, M., 2007. Métodos de análisis de tejidos vegetales. Santiago. Chile. Comisión de Normalización y Acreditación Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo pp. 53.
- Scholes, B., 1999. Will the terrestrial carbon sink saturate soon? *IGBP Global Change NewsLetter*, March, 37.
- Shedayi, A.A., Xu, M., Naseer, I., Khan, B., 2016. Altitudinal gradients of soil and vegetation carbon and nitrogen in a high-altitude nature reserve of Karakoram ranges. *Springer Plus*. 5, 320. doi: <https://doi.org/10.1186/s40064-016-1935-9>
- Sheikh, A.M., Kumar, M., Bussman, R., 2009. Altitudinal variation in soil organic carbon Stock in coniferous Subtropical and broadleaf temperate forests in Garhwal Himalaya. *Carbon Balance Management*. 4, 1 – 6.
- Stinziano, J.R., Way, D.A., 2014. Combined effects of rising [CO<sub>2</sub>] and temperature on boreal forests: growth, physiology and limitations. *Botany*. 92, 425–436.
- Tomazello, M., Brazolini, S., Chagas, M., Oliveira, T., Ballarin, A., Benjamin, C., 2008. Application of X-Ray Technique in Nondestructive Evaluation of Eucalypt Wood. *Maderas Ciencia y Tecnología*. 10: 139-150.
- USDA (United States Department of Agriculture), 2014. Soil Survey Staff. 12<sup>o</sup> ed. US-Environmental Protection Agency, Washington. pp. 140.
- Vesterdal, L., Clarke, N., Sigurdsson, B.D., Gudersen, P., 2013. Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? *Forest Ecology Management*. 309, 4-18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.01.017>
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J.J., López-Upton, J., Ramírez-Valverde, G., Santacruz-Varela, A., 2009. Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl.: Height growth, shoot phenology and cold damage in seedlings. *Forest Ecology and Management*. 257, 836–842. doi: 10.1016/j.foreco.2008.10.021

- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37, 29-37.
- Way, D.A., Sage, R.F., 2008. Elevated growth temperatures reduce the carbon gain of black spruce [*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.]. *Global Change Biology*. 14, 624–636.
- Yang, B., He, M., Melvin, T.M., Zhao, Y., Briffa, K.R., 2013. Climate Control on Tree Growth at the Upper and Lower Treelines: A Case Study in the Qilian Mountains, Tibetan Plateau. *PLoS ONE* 8(7): e69065. doi:10.1371/journal.pone.0069065.

*“ Los sueños se hacen realidad, y tal vez  
algo maravilloso va a suceder” ...*

*Walt Disney*