

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Densidad de Carbono de la Biomasa Viva Aérea y su Vulnerabilidad Ante Factores  
Climáticos en los Bosques Templados de México

Por:

**PAOLA JUDITH MARÍN GARCÍA**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
DEPARTAMENTO FORESTAL

Densidad de Carbono de la Biomasa Viva Aérea y su Vulnerabilidad Ante Factores  
Climáticos en los Bosques Templados de México

Por:

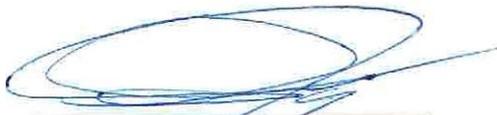
**PAOLA JUDITH MARÍN GARCÍA**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Aprobada por el Comité de Asesoría:



---

Dr. Jorge Méndez González

Asesor Principal



---

Dr. Francisco Cruz García

Coasesor



---

Dr. Andrés Flores García

Asesor Principal Externo



---

Dr. Celestino Flores López

Coasesor



---

Dr. Alberto Sandoval Rangel  
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Junio 2025

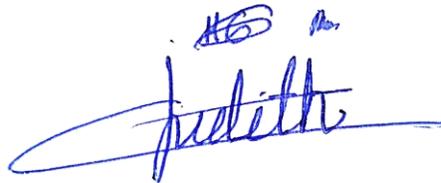
## **Derechos de autor y declaración de no plagio**

El autor principal quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Autor principal



---

Paola Judith Marín García

## **DEDICATORIA**

**A mis padres:** Sergio y Guadalupe por estar, cuidar, creer y ser mi primer ejemplo de esfuerzo y constancia, por enseñarme con su vida, que los sueños se alcanzan con sacrificios y humildad, todo lo que soy se construyó sobre el esfuerzo y los sueños que ustedes sembraron en mí. Cada palabra de aliento, cada sacrificio silencioso y cada lágrima escondida tras una sonrisa me han traído hasta aquí.

**A mis hermanos:** Por ser mis cómplices en la vida y tener siempre su apoyo incondicional, por estar presentes, por las risas compartidas y por caminar conmigo, aún en la distancia.

**A mis abuelos:** Quienes siempre confiaron en mí y me brindaron sus consejos llenos de experiencia.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por permitirme pertenecer y desarrollarme de manera profesional.

Al **Departamento Forestal** el cual permite formar profesionistas Forestales a través de las enseñanzas, prácticas de campo, vivencias y más.

A mis **Profesores** muchos de ellos fueron de gran importancia para mi formación académica al brindarme sus conocimientos.

A mi **Asesor Principal el Dr. Jorge Méndez** por su tiempo, apoyo, enseñanzas y principalmente por su dedicación al compartir su conocimiento durante todo el proceso para desarrollar mi trabajo de tesis.

A mis **Coasesores el Dr. Francisco Cruz, Dr. Celestino Flores y Dr. Andrés Flores** al formar parte de mi comité de asesores, agradezco al Dr. Francisco y Dr. Celestino quienes también fueron mis profesores durante la carrera.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo e hipótesis -----	5
1.1.1. Objetivo general.....	5
1.1.2. Objetivos específicos .....	5
1.2. Hipótesis -----	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1. Bosques del mundo -----	6
2.2. Bosques de México -----	7
2.3. Cambio climático-----	8
2.4. Variables bioclimáticas -----	9
2.5. Regresión -----	10
2.6. Relación entre la $cdAGB$ y las variables bioclimáticas -----	10
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
3.1. Descripción del área de estudio y especies -----	13
3.1.1. Datos .....	13
3.2. Análisis estadístico -----	14
3.2.1. Correlación bayesiana.....	14
3.3. Análisis de punto de inflexión y mapeo-----	14
3.4. Distribución geográfica y estructural de la vulnerabilidad -----	15
4. Resultados.....	16
4.1. Correlaciones bayesianas de la densidad de carbono: clima y especies -----	17
4.2. Importancia de las variables bioclimáticas -----	20
4.3. Umbrales de vulnerabilidad en especies de <i>Pinus</i> y <i>Quercus</i> -----	22
4.4. Percentiles críticos y áreas de riesgo -----	27
4.5. Contrastes ambientales entre grupos vulnerables -----	27

5. Conclusiones.....	35
6. Bibliografía.....	36
7. Anexos.....	43

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Información dasométrica de 12 especies del bosque templado de México, para el análisis de vulnerabilidad de la densidad de carbono con variables bioclimáticas. ....	17
Cuadro 2. Prueba de Davies para determinar cambios en pendientes entre $c_dAGB$ y variables bioclimáticas en nueve especies de bosques templados de México en relación con la variable de mayor importancia. ....	23
Cuadro 3. Análisis estadístico de diferencias altitudinales entre sitios vulnerables y no vulnerables, en bosques templados de México. ....	28
Cuadro 4. Análisis estadístico de diferencias longitudinales entre sitios vulnerables y no vulnerables, en bosques templados de México. ....	29
Cuadro 5. Análisis estadístico de diferencias latitudinales entre sitios vulnerables y no vulnerables, en bosques templados de México. ....	30
Cuadro 6. Análisis estadístico de diferencias de densidad de carbono de la biomasa viva aérea entre sitios vulnerables y no vulnerables, en bosques templados de México. ....	31
Cuadro 7. Resumen de las estadísticas descriptivas de la variable más importante para nueve especies de bosque templado en México. ....	32

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Correlación bayesiana entre 19 variables bioclimáticas y la densidad de carbono de la biomasa viva aérea en 12 especies de bosque templado de México. La línea vertical separa las bios de temperatura a la izquierda y de precipitación a la derecha. Barras azules representan correlación negativa y, verdes correlación positiva. El valor sobre cada barra indica el % en ROPE (Región de Equivalencia Práctica). a): <i>P. devoniana</i> ; b): <i>P. douglasiana</i> ; c): <i>P. leiophylla</i> ; d): <i>P. oocarpa</i> ; e): <i>P. patula</i> ; f): <i>P. pseudostrobus</i> ; g): <i>Q. crassifolia</i> ; h): <i>Q. laurina</i> ; i): <i>Q. magnoliifolia</i> ; j): <i>Q. radiata</i> ; k): <i>Q. resinosa</i> y l): <i>Q. rugosa</i> . .....	19
Figura 2. Importancia relativa de 19 variables bioclimáticas para predecir la densidad de carbono de la biomasa viva aérea en 12 especies de bosques templados de México. Dentro de cada celda se indica el valor de importancia con base a un modelo de Random Forest. De izquierda a derecha: <i>P. patula</i> , <i>P. devoniana</i> , <i>Q. radiata</i> , <i>Q. crassifolia</i> , <i>P. douglasiana</i> , <i>P. leiophylla</i> , <i>Q. resinosa</i> , <i>Q. laurina</i> , <i>P. oocarpa</i> , <i>Q. rugosa</i> , <i>P. pseudostrobus</i> y <i>Q. magnoliifolia</i> . .....	22
Figura 3 Prueba de Davies y regresión segmentada entre la densidad de carbono de la biomasa viva aérea y la variable bioclimática de mayor importancia, en 12 especies de bosques templados en México. Los puntos azules representan los sitios del INFyS, la línea roja corresponde al modelo ajustado de regresión segmentada y la región sombreada indica el intervalo de confianza del modelo. De la a-f corresponde a las 6 especies de coníferas y de g-l latifoliadas. <i>P. devoniana</i> , <i>P. douglasiana</i> , <i>P. leiophylla</i> , <i>P. oocarpa</i> , <i>P. patula</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>Q. crassifolia</i> , <i>Q. laurina</i> , <i>Q. magnoliifolia</i> , <i>Q. radiata</i> , <i>Q. resinosa</i> y <i>Q. rugosa</i> . .....	26
Figura 4. Distribución espacial de la densidad de carbono y estatus de vulnerabilidad para el género <i>Pinus</i> basado en los sitios del Inventario Nacional de Bosques y Suelos (2015-2020). El tamaño de los círculos indica la densidad de carbono y el gradiente de color de acuerdo a su vulnerabilidad, N-V: No vulnerables; V: Vulnerables. .....	33
Figura 5. Distribución espacial de la densidad de carbono y estatus de vulnerabilidad para el género <i>Quercus</i> basado en los sitios del Inventario Nacional de Bosques y Suelos (2015-2020). El tamaño de los círculos indica la densidad de carbono y el gradiente de color el estatus de acuerdo a su vulnerabilidad, N-V: No vulnerables; V: Vulnerables. .....	34

## RESUMEN

Los bosques templados de México son ecosistemas clave para la mitigación del cambio climático, debido a su papel en el almacenamiento de carbono, regulación hídrica y conservación de la biodiversidad. Sin embargo, el cambio climático ha alterado sus procesos ecológicos y ha amenazado su estructura y persistencia. Ante este contexto, el objetivo del presente estudio fue determinar la relación entre la densidad de carbono de la biomasa viva aérea ( $_{cd}AGB$ ) y variables bioclimáticas en especies de los géneros *Pinus* y *Quercus*; así como identificar umbrales de vulnerabilidad climática. Se analizaron 12 especies (6 pinos y 6 encinos) utilizando datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (2015–2020) y 19 variables bioclimáticas de WorldClim 2.0. Se aplicó correlación bayesiana, modelos de Random Forest y regresión segmentada. Los resultados indicaron que *Pinus patula* presentó la mayor  $_{cd}AGB$  ( $49.1 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), mientras que *Quercus radiata* la menor ( $2.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Las correlaciones fueron más frecuentes con variables de temperatura (45 correlaciones) y, se destacó la estacionalidad de la temperatura (bio4) como la variable de mayor importancia en cuatro especies. Se identificaron umbrales bioclimáticos en 9 de las 12 especies, con pendientes negativas en la relación  $_{cd}AGB$  -temperatura en especies como *P. patula* (hasta  $-43.47 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) y *Q. rugosa* ( $-6.42 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). El único cambio positivo se observó en *Q. magnoliifolia* en relación con la precipitación del trimestre más cálido. Estas evidencias sugieren que, bajo escenarios de incremento térmico, muchas especies reducirán su capacidad de acumulación de carbono y serán más vulnerables. Se concluye que la estacionalidad y el rango anual de la temperatura son factores determinantes para la biomasa aérea, por lo que los umbrales detectados pueden ser útiles para priorizar acciones de conservación y manejo forestal adaptativo frente al cambio climático.

**Palabras clave:** Variables bioclimáticas, bosques templados, biomasa, correlación, cambio climático.

## SUMMARY

The temperate forests of Mexico are key ecosystems for climate change mitigation due to their role in carbon storage, water regulation, and biodiversity conservation. However, climate change has altered their ecological processes, threatening their structure and persistence. In this context, the aim of the present study was to determine the relationship between aboveground live biomass carbon density ( $c_{dAGB}$ ) and bioclimatic variables in species of the *Pinus* and *Quercus* genera, as well as to identify climatic vulnerability thresholds. Twelve species (6 pines and 6 oaks) were analyzed using data from the National Forest and Soils Inventory (2015–2020) and 19 bioclimatic variables from WorldClim 2.0. Bayesian correlation, Random Forest models, and segmented regression were applied. The results indicated that *Pinus patula* presented the highest  $c_{dAGB}$  (49.1 Mg ha<sup>-1</sup>), while *Quercus radiata* had the lowest (2.7 Mg ha<sup>-1</sup>). Correlations were more frequent with temperature variables (45 correlations), highlighting temperature seasonality (bio4) as the most important variable in four species. Bioclimatic thresholds were identified in 9 out of the 12 species, with negative slopes in the  $c_{dAGB}$  -temperature relationship in species such as *P. patula* (up to -43.47 Mg ha<sup>-1</sup>) and *Q. rugosa* (-6.42 Mg ha<sup>-1</sup>). The only positive change was observed in *Q. magnoliifolia* in relation to precipitation of the warmest quarter. These findings suggest that, under warming scenarios, many species will experience reduced carbon accumulation capacity, making them more vulnerable. It is concluded that temperature seasonality and annual temperature range are key factors for aboveground biomass, and that the detected thresholds may be useful for prioritizing conservation actions and adaptive forest management in the face of climate change.

**Key words:** Bioclimatic variables, Temperate forests, Biomass, Correlation, Climate change.

## 1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial el área total cubierta por bosque asciende a algo más de 4 000 millones de hectáreas, lo que representa el 31 % de la superficie y corresponde a 0.6 hectáreas promedio per cápita, donde Rusia, Brasil, Canadá, Estados Unidos de América y China son los países con la mayor riqueza forestal (más de la mitad del área total de bosques) (FAO, 2010).

De esta manera, los bosques mundiales representan grandes reservas de carbono y, por ello, funcionan como importantes sumideros (con valores netos de carbono de  $-7.6 \pm 49$  Gt CO<sub>2</sub> año<sup>-1</sup>), ya que juegan un rol clave en la mitigación del cambio climático, ya que funcionan como reguladores del clima (Harris et al., 2021). De acuerdo con la FAO, (2010), estos ecosistemas almacenan alrededor de 650, 000 millones de toneladas de carbono, con 45 % en el suelo, 44 % en la biomasa y 11 % en otros componentes madera muerta y hojarasca. Esta capacidad de almacenamiento junto con su biodiversidad permite reconocerlo como algunos de los ecosistemas más ricos y diversos en cuanto al número de especies.

En México, los bosques templados cubren alrededor del 21 % de la superficie del país, albergan más de 7000 especies, lo que representa cerca del 25 % de la flora total registrada a nivel nacional (Rzedowski, 1991). Sin embargo, estos ecosistemas han sufrido severas pérdidas de biodiversidad, ya que un 25 % de los bosques originales se ha convertido a agricultura o ganadería (Gómez et al., 2007); aunado a esto, estos bosques son objeto de extensa explotación (Rzedowski, 2006).

En el país se tienen 43 de las 110 especies de pino y 161 de las 531 especies de encino a nivel mundial, 55 % de endemismo en pinos y 21 % en encinos (Gómez et al., 2007; Sánchez, 2008), por lo tanto, es importante conocer cuáles son las afectaciones que se pueden presentar dentro de estos ecosistemas, específicamente para el género *Pinus* y *Quercus* debido al cambio climático.

VARIABLES como la temperatura y la precipitación se encuentran asociadas con otros elementos del factor clima como: la radiación solar, la evapotranspiración, la humedad del aire y el viento por lo que, al hablar de cambio climático no solo se hace referencia a que la temperatura y la precipitación cambien, sino que también todos los demás elementos que se encuentran en sinergia (Barradas et al., 2011). Sin embargo, Díaz, (2012) menciona que el cambio climático es una problemática global que está siendo tratada por expertos de todo el mundo y concluyen en que el clima cambia tanto por causas naturales como de origen antropogénico. Al respecto, la degradación del medio ambiente es un hecho que se manifiesta de forma observable con la extinción de especies, contaminación de cuerpos de agua y aire, desastres naturales, cambios en el clima, periodos largos de sequía, deshielos en los polos, prolongadas precipitaciones, cambios en la migración de los animales, entre otros.

En el caso de México, según Conde (2007) desde hace poco más de cien años la pérdida de los bosques y la vegetación de regiones muy amplias se ha dado mediante un proceso sumamente rápido, ya que se han perdido hasta 6.3 millones de hectáreas de bosque, lo que posiciona al país en el segundo lugar en cuanto a deforestación forestal dentro de América Latina. Según Villers et al. (2000), las comunidades vegetales más vulnerables en México son aquellas ubicadas en regiones con climas templados, como los bosques templados (de coníferas y encinos), ya que aparentemente el nivel de deterioro antropogénico es menor y la afectación por el cambio climático es mayor.

Los bosques templados están presentando cambios complejos en respuesta al clima, aumento/decremento en la productividad, asociados al estrés por las sequías debido al incremento de las temperaturas (Pan et al., 2013). Otros autores mencionan que en los escenarios del IPCC se proyecta un aumento de temperatura superficial promedio global de 1.4 a 5.8 °C durante el periodo de 1990 a 2100, además se prevén variaciones en la precipitación a escala regional del 5 al 20 %. Estas condiciones afectan la diversidad de los sistemas ecológicos, de tal manera que las especies consideradas como vulnerables tendrían un mayor riesgo de extinción (Albritton et al., 2001).

En México se han presentado reducciones consistentes de la temperatura máxima en el 13 % del territorio nacional, mientras que un 12 % presentó aumentos. La precipitación anual ha presentado aumentos del 18 % y reducciones del 5 % consistentes en el país, que afecta

principalmente en las provincias del Altiplano Norte, Sierra Madre Occidental, Sonorense, Baja California y Petén (Cuervo et al., 2020).

Se ha reportado que la temperatura y la precipitación son factores climáticos muy influyentes en los procesos fisiológicos de las plantas como (Bennett et al., 2020): la fotosíntesis, absorción de agua y nutrientes, la respiración y el desarrollo foliar. Este último a su vez influye en la productividad y el almacenamiento de la biomasa. La temperatura controla tanto la velocidad de absorción de CO<sub>2</sub> por las hojas como las pérdidas de carbono derivadas de la respiración, procesos esenciales para conservar el tejido vivo. Por otra parte, la precipitación incide en la conductividad estomática, la absorción de nutrientes y el índice foliar ya que influye en la disponibilidad de agua.

(Han et al. 2012) han documentado que el aumento de la temperatura afecta negativamente en el crecimiento inicial y la fisiología de las plantas, ya que reduce el desarrollo radicular, limita la absorción de nutrientes del suelo y disminuye el contenido de pigmentos de las hojas. Esto inhibe el crecimiento de la parte aérea, de tal manera que, las temperaturas elevadas pueden provocar estrés hídrico, y afectar la biomasa y el rendimiento general de la planta.

La densidad de carbono de la biomasa viva aérea (*cdAGB*) es considerada como la cantidad de carbono por área en toda la biomasa viva que se encuentra sobre el suelo, e incluye tallos, tocones, ramas, corteza, semillas y follaje (Liu et al., 2014; Penman et al., 2018). De acuerdo con los valores obtenidos por Rodríguez et al. (2016) el carbono estimado en la biomasa viva aérea para México es de 1.69 Gt C con una incertidumbre relativa restringida por debajo de  $\pm 1$  % a nivel nacional; sin embargo, es cercano al 1.53 Pg C descrito en otros estudios (Cartus et al., 2014).

Por lo tanto, es importante determinar la correlación entre la *cdAGB* de especies de bosques templados con las variables climáticas ya que dependiendo de esto se podrá identificar si una especie es vulnerable o no al cambio climático.

De tal manera que la cantidad de biomasa estará influenciada de manera directa e indirecta por los diversos factores bióticos y abióticos que componen los bosques (Wang et al., 2022). Autores como Bennett et al. (2020) han documentado que el factor clima resulta ser más importante para explicar la distribución de la biomasa que el factor suelo y sugieren que es importante incluir

otros factores como la diversidad de las especies, la estructura, distribución por edad de los bosques y regímenes de perturbación (incendios forestales) ya que son factores importantes que influyen en la distribución de la biomasa.

La vulnerabilidad se define como el grado de susceptibilidad o incapacidad de un sistema para enfrentar los efectos adversos del cambio climático, en particular la variabilidad climática y los fenómenos extremos. De tal manera que la vulnerabilidad dependerá de la magnitud, el carácter y la rapidez del cambio climático a los que se encuentra expuesto el sistema. Además, la vulnerabilidad también está en función de tres componentes principales: la exposición (cambios potenciales en el clima), la sensibilidad (grado de afectación por el cambio climático) y la capacidad adaptativa o potencial que le permitan ajustarse al cambio climático para hacer frente a las consecuencias y reducir los daños (IPCC, 2007).

De acuerdo con Wang et al. (2019) el 3.6 % de 387 ecorregiones analizadas presentan una alta vulnerabilidad y se encuentran clasificadas bajo estado crítico o en peligro. Estas ecorregiones se distribuyen en los reinos Neártico, Neotrópico y Paleártico, y abarcan diversos tipos de ecosistemas. Entre ellos los bosques templados de coníferas, los bosques templados latifoliados y mixtos, así como los bosques tropicales y subtropicales latifoliados secos y húmedos.

Según (Foden et al. 2013), las evaluaciones de vulnerabilidad permiten identificar qué especies presentan mayor riesgo de reducción poblacional, desplazamiento o extinción local, e integran los componentes de la exposición al cambio climático, la sensibilidad ecológica y su capacidad adaptativa. Por ello que es fundamental no ignorar las diferencias biológicas existentes entre especies, porque se podría aumentar o disminuir la vulnerabilidad que están teniendo las especies y al mismo tiempo permiten diseñar propuestas de conservación mediante índices específicos por especie y su área de distribución. Por lo que, evaluar la vulnerabilidad de seis pinos y seis encinos ante el cambio climático en México es fundamental para determinar y comprender la relación existente entre la  $cdAGB$  y las variables bioclimáticas, mediante la identificación del estatus de vulnerabilidad para cada una de las especies analizadas.

## **1.1. Objetivo e hipótesis**

### 1.1.1. Objetivo general

Determinar la relación entre la densidad de carbono de la biomasa viva aérea ( $_{cd}AGB$ ) en bosques templados de México y las variables bioclimáticas, para determinar la existencia o no de umbrales bioclimáticos.

### 1.1.2. Objetivos específicos

Determinar la relación entre la densidad de carbono de la biomasa viva aérea y las variables bioclimáticas.

Determinar la existencia o no de umbrales de vulnerabilidad de la densidad de carbono de la biomasa viva aérea en las especies con respecto a la variable bioclimática.

## **1.2. Hipótesis**

Hipótesis: Los bosques templados de pino y encino en México presentan una relación significativa con las variables climáticas de temperatura y precipitación, y con ello, umbrales bioclimáticos en ambos géneros (*Pinus* y *Quercus*).

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Bosques del mundo**

Los bosques son ecosistemas de gran valor por considerarlos como patrimonio de la humanidad y su contribución al bienestar humano, por lo tanto, la diversidad existente en ellos y su complejidad es grande. Sin embargo, muchos de los procesos ecológicos fundamentales en estos ecosistemas son comunes en lugares de todo el mundo. Por ejemplo, el ciclo hidrológico sucede por la evapotranspiración de las masas de vegetación de los árboles los cuales mediante la concentración de gotas de agua forman las nubes en la atmósfera y que son transportadas por el viento; al enfriarse producen la lluvia y contribuyen así al ciclo del agua, por lo tanto, si todas estas masas vegetales no transpiraran la cantidad, y el ritmo de las lluvias cambiaría (causa de la deforestación y el cambio climático). Otros papeles importantes que cumplen los bosques son: la protección de suelo frente a la erosión, el reciclado de nutrientes, la perpetuidad de la biodiversidad de plantas y animales, la formación de paisajes forestales y la permanencia de la vida humana (Larrazabal et al., 2011).

Percy et al. (2003) mencionan que en el año 2000 aproximadamente un 30 % de la superficie terrestre mundial estaba cubierta por bosques; la mayor distribución se encontraba en los trópicos (casi la mitad), una tercera parte en la zona boreal y aproximadamente el 10 % restante se ubicaba en regiones forestales templadas y subtropicales. Dicha superficie ha cambiado a causa de las actividades antropogénicas. Por ejemplo, en el periodo de 1990 al 2000 la superficie forestal de los trópicos se vio reducida con valores de 14.2 millones de hectáreas por año, a causa de la deforestación.

Según la FAO. (2022), el 34 % de todos los bosques del mundo (una tercera parte) son primarios. Estos están constituidos por especies arbóreas nativas y no existen indicios de las actividades antropogénicas, de tal manera que los procesos ecológicos no se han visto afectados significativamente. Desde el año 2000, a nivel mundial se perdieron 47 millones de hectáreas. Aunado a esto, en 2015 los incendios forestales afectaron 98 millones de hectáreas de los

bosques mundiales. Sin embargo, la pérdida de los bosques puede tener repercusiones directas e indirectas sobre la sociedad, ya que se estima que más de la mitad del producto interno bruto (PIB) mundial depende de los servicios ecosistémicos; tan solo el sector forestal aporta 1.52 billones de dólares y requiere de 33 millones de personas para cubrir las diferentes actividades que se realizan.

## **2.2. Bosques de México**

En México, el 60 % de superficie terrestre está cubierta por bosques y selvas, lo que comprende más de dos tercios del territorio nacional, con áreas forestales conformadas por bosques, selvas, pastizales, matorrales xerófilos y áreas con otro tipo de vegetación o sin vegetación aparente. Las principales áreas arboladas (bosques y selvas) contienen 48 millones de hectáreas (representa el 71 %), las cuales se concentran en los estados de Chihuahua, Durango, Oaxaca, Sonora, Jalisco, Guerrero, Michoacán, Chiapas, Campeche y Quintana Roo; sin embargo, estas áreas están sufriendo transformaciones vegetales antropogénicas desde hace miles de años debido a la fuerte influencia de la humanidad que ha modificado los paisajes de México (Chapela, 2012).

En el estudio de Rosete et al. (2014), se demuestra que para México, en el periodo de 1976 al 2007 la vegetación forestal primaria se vio afectada en 16 575 924 hectáreas, las cuales fueron deforestadas y representó una pérdida de vegetación promedio de 534 707 hectáreas por año. Estas cifras son atribuidas principalmente a que existe una tendencia clara hacia el cambio de uso de suelo forestal para uso agropecuario, en específico agricultura de temporal. En el caso de la vegetación secundaria, el 64 % existente en el año de 1976 se mantuvo bajo esa misma condición, pero en el 2007 se detectaron alteraciones constantes que no permitieron la recuperación de la vegetación forestal; sin embargo, no fueron lo suficientemente intensas para que sean consideradas como áreas deforestadas. Lo antes mencionado indica que la deforestación no ha disminuido, sino que se ha estabilizado en 500 000 hectáreas anuales en el periodo de 1993 al 2007.

De acuerdo con estudios desarrollados por Galicia et al. (2016), los bosques templados de México se distribuyen en siete suelos, principalmente: Leptosol, Regosol, Luvisol, Phaeozems, Cambisol, Umbrisol y Andosol, los cuales son conformados a partir de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. De tal manera que los suelos que sostienen la mayor cantidad de

bosques templados (58.6 %) son someros y con un incipiente desarrollo (por ejemplo: Leptosoles y Regosoles). Estos autores también mencionan, que los cambios producidos sobre los flujos de carbono han sido el resultado de modificaciones generadas a escala local y por actividades antropogénicas. Ejemplos de ello son el manejo forestal, el cambio uso de suelo, la sustitución de especies y los incendios, en el que el cambio uso de suelo es el principal factor explicativo de los flujos de carbono sin existir aún evidencia clara de que su efecto sea negativo.

### **2.3. Cambio climático**

Algunos autores como González et al. (2003) describen al cambio climático como un fenómeno provocado por el incremento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero en la atmósfera (principalmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)), relacionados directa e indirectamente con las actividades humanas como la deforestación y uso de combustibles fósiles. De acuerdo con Vargas (2009), las regiones que presentan mayores afectaciones debido al cambio climático son África, América Latina y el sur y sureste de Asia, mientras que los países menos afectados son Estados Unidos y China; sin embargo, estos dos últimos presentan la mayor acumulación de gases de efecto invernadero.

Las afectaciones en la dinámica de los ecosistemas forestales y la resiliencia a las enfermedades y especies invasoras son afectadas por el cambio climático y la influencia de los seres humanos. Por tal motivo es probable que ninguna de las economías nacionales será capaz de mantener sus riquezas y bienestar si no se detiene la destrucción de la naturaleza y el cambio climático (FAO, 2022). Según Vargas (2009), con las mediciones que han sido más difundidas por el impacto del cambio climático global, se estiman pérdidas de hasta 20 % del producto interno bruto mundial, con aumentos superiores a los 5 °C en la temperatura.

En otros estudios se ha documentado que en regiones del estado de Veracruz se han detectado cambios en las precipitaciones pluviales en los parteaguas con aumentos que van desde 0.3 hasta 1.1 milímetros al año y que los niveles de condensación por ascenso también han aumentado de 200 hasta 400 metros de altura (Barradas et al., 2011). Dichos cambios son atribuidos al cambio climático y se sabe que estos tendrán efectos sobre otras variables climáticas como la radiación solar, lo que puede a su vez afectar la fisiología de las especies y por ende su distribución. Estos mismos autores encontraron que *Pinus patula* es de las especies que se verían afectadas

severamente con riesgos de desaparición, porque presenta intervalos térmicos óptimos restringidos que no le permitirán sobrevivir donde se distribuye actualmente.

De acuerdo con Watkins, (2007), el cambio climático es un hecho comprobado mundialmente por la ciencia y es difícil poder predecir los impactos generados por los gases de efecto invernadero. Por ello, la sociedad debe estar consciente sobre los riesgos a los que estará expuesta, ya que son catastróficos y potencialmente grandes, e independientemente de las medidas que se tomen hoy en día se tendrán consecuencias futuras que van a perdurar por mucho tiempo. Los gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera han sobrepasado la carga atmosférica del planeta porque se han quedado atrapados reteniendo el calor en la Tierra.

#### **2.4. Variables bioclimáticas**

Varela et al. (2015) menciona que Worldclim contiene un repositorio de variables climáticas el cual es abierto y libre. Este a su vez ha permitido el desarrollo de diferentes trabajos sobre cambio climático, macroecología y de biogeografía en los últimos diez años. El repositorio generado cuenta con 19 variables bioclimáticas, que están disponibles en distintos formatos tipo ráster y con resoluciones espaciales diferentes. Las capas disponibles se elaboran a partir de información histórica de las variables climáticas como proyectos. Estas capas integran información derivada de los modelos de circulación global relacionados, y producen una interpolación para representar las condiciones climáticas actuales. De las 19 variables generadas a partir de datos brutos de 48 variables mensuales, once corresponden a variables de temperatura (temperatura media anual, rango medio diurno, isothermalidad, estacionalidad de la temperatura, temperatura máxima del mes más cálido, temperatura mínima del mes más frío, rango anual de temperatura, temperatura media del trimestre más húmedo, temperatura media del trimestre más seco, temperatura media del trimestre más cálido y la temperatura media del trimestre más frío) y solo ocho de precipitación (precipitación anual, precipitación del mes más lluvioso, precipitación del más seco, estacionalidad de la precipitación, precipitación del trimestre más húmedo, precipitación del trimestre más seco, precipitación del trimestre más cálido y precipitación del trimestre más frío).

## 2.5. Regresión

Hay diversas herramientas matemáticas que facilitan la identificación de la relación entre dos o más variables, siendo el análisis de regresión una de las más relevantes que, permite conocer si existe una relación o no. Estos modelos fueron desarrollados por A. M. Legendre, quien en 1805, propuso por primera vez un modelo de tipo lineal. En algunos casos, la relación entre las variables y la respuesta no es lineal, lo que provoca cambios abruptos en dicha respuesta. Estas modificaciones se denominan puntos de inflexión, ruptura, transición o cambio, y su estudio se realiza a través de modelos de regresión segmentada (Ávila, 2020).

Autores como (Muggeo 2008) mencionan que los modelos de línea quebrada o segmentados son modelos de regresión en los que la relación entre una o más variables explicativas y la variable de respuesta presentan una forma lineal por tramos o por partes. Esto indica que la relación representada se compone de dos o más segmentos de línea recta que se elazan en puntos cuya ubicación no es conocida. Estos valores se les denomina *breakpoints*, *joinpoints* o *change-points*.

## 2.6. Relación entre la $cdAGB$ y las variables bioclimáticas

Los bosques del mundo evidencian afectaciones severas debido al cambio climático, lo que repercute directamente en la densidad de carbono de la biomasa viva aérea. Revisiones previas han identificado que factores ambientales controlan la estructura y distribución global de los bosques, mediante la evaluación de su trayectoria actual y futura. Las variables bioclimáticas son las determinantes principales de la distribución global de los bosques, ya que las adaptaciones de los árboles al clima y a los gradientes de recursos crean patrones geográficos complejos en los ensamblajes y estructuras forestales. Las adaptaciones se atribuyen a la estacionalidad de la temperatura y las precipitaciones en las regiones geográficas, dado que, los bosques mundiales muestran aumentos consistentes en la densidad de biomasa y carbono total, a pesar del incremento reportado en la tasa de mortalidad (Pan et al., 2013).

Los efectos de factores bióticos y abióticos sobre la biomasa aérea (AGB) de 76 metacomunidades forestales en 24 estudios globales describen que la AGB aumenta directamente de forma significativa con una mayor disponibilidad de agua y disminuye con el aumento de la temperatura media anual. Esto indica que los bosques que se encuentran en

regiones con mayor humedad acumulan más biomasa, y bajo condiciones más cálidas presentan limitaciones de acumulación de biomasa debido al poco desarrollo que presentan los árboles con rasgos dominantes (como la altura máxima) (Wang et al., 2021). Aunado a esto, otros autores como Bennett et al. (2020) también sugieren que los factores abióticos (variables bioclimáticas) son los impulsores dominantes en la distribución de la  $cdAGB$ , puesto que la temperatura media del trimestre más seco es la variable climática más importante en los modelos que contienen solo clima y en los que combinaban clima y suelo al explicar 47 % de la variación en la biomasa.

Algunos autores describen que los bosques templados presentan una densidad de carbono en la biomasa aérea notablemente mayor (con densidades de hasta 752, 718 y 653  $Mg\ C\ ha^{-1}$ ) que los bosques tropicales (Liu et al., 2014). A nivel global, los bosques templados húmedos de Australia presentan los mayores valores de densidad de carbono de biomasa total conocida (con un promedio de 1.867 toneladas de carbono por hectárea), lo cual se identificó basándose en factores como temperaturas relativamente frías y precipitaciones moderadamente altas, ya que favorecen un rápido crecimiento, pero una descomposición lenta (Keith et al., 2009).

Otros autores como Liu et al. (2014) describen a los bosques primarios como aquellos que presentan un umbral de edad de 450 a 500 años y sugieren que son más antiguos de lo que se pensaba anteriormente: en esta clase de edad la  $cdAGB$  promedio (con un aumento en su tasa de 1.03  $Mg\ C\ ha^{-1}$  por año) es superior a las demás, por lo que estos bosques siguen siendo sumideros de carbono. En el caso de México, la mayoría de los bosques tienen una densidad de carbono sobre el suelo por debajo de 50  $t\ C\ ha^{-1}$  (Cartus et al., 2014). Este valor elevado se vincula de forma casi exclusiva con los bosques tropicales húmedos, que están presentes principalmente en la región de la Península de Yucatán, las zonas más elevadas de la Sierra Madre del Sur y las mayores elevaciones del Eje Neovolcánico Transmexicano.

Sin embargo, según la clasificación mexicana entre un 65 y 70 % de los bosques de coníferas y encinos se verán afectados (Villers et al., 1997), al disminuir considerablemente y promover la redistribución o el crecimiento de nuevos tipos adaptados a condiciones más secas y cálidas; mientras que bajo el escenario Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) (aumento de 3.2 °C, +20 % precipitación) se predice su desaparición total. Por tal motivo las zonas templadas

de México son los ecosistemas más vulnerables al cambio climático con riesgos de reducciones drásticas o desaparición bajo todos los escenarios climáticos.

El clima es un factor importante en la variación de la densidad de biomasa aérea en la mayoría de las especies dado que están correlacionadas. En un estudio previo entre la  $_{cd}AGB$  y variables bioclimáticas, realizado en 10 especies pino de México, la temperatura desempeñó un papel determinante en la productividad y distribución de las especies al presentar el 76 % de correlaciones en unas de las seis especies estudiadas (el 59.30 % son negativas). Esto muestra a la temperatura, como la variable más influyente para las especies de pino, mientras que la precipitación resultó tener únicamente nueve asociaciones positivas y cuatro negativas, lo que representó el 24 % del total. Por tal motivo, el aumento de la temperatura podría llevar a una disminución en la  $_{cd}AGB$  de algunas especies, contrario a las correlaciones positivas de la precipitación que incrementan la acumulación de  $_{cd}AGB$  (Girón et al., 2024).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Descripción del área de estudio y especies

En México, los bosques de coníferas se extienden desde los 150 hasta los 4000 msnm, principalmente en zonas montañosas con climas templados a frío, con temperaturas anuales de 6 a los 28 °C y precipitaciones de 350 a más de 1000 mm; aunque prefieren suelos ácidos (pH 5-7), el color, la textura y el contenido de nutrientes presentan amplias variaciones de un área a otra, lo que ha dado paso a la formación de distintas comunidades secundarias como bosques de pino, encino-pino, pino-encino, *Abies*, *Pseudotsuga*, *Picea*, *Juniperus* y *Cupressus*, según la especie dominante (Rzedowski et al., 2006).

Para este estudio se seleccionaron doce especies, seis pinos y seis encinos: *Pinus devoniana* Lindl. de aquí en adelante (Pdev), *Pinus douglasiana* Martínez (Pdou), *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl (Plei), *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl (Pooc), *Pinus patula* Schiede (Ppat) y Cham, *Pinus pseudostrobus* Lindl (Ppse), *Quercus crassifolia* Bonpl (Qcra), *Quercus laurina* Humb et Bonpl (Qlau), *Quercus magnoliifolia* Née (Qmag), *Quercus radiata* Trel (Qrad), *Quercus resinosa* Liebm (Qres) y *Quercus rugosa* Née (Qrug).

##### 3.1.1. Datos

Se utilizaron datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) de México, del periodo 2015-2020 (<https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/772>), que incluyen entre otras cosas: diámetro normal (cm), altura total (m), área basal (m<sup>2</sup>), densidad de carbono de la biomasa viva aérea, de aquí en adelante  $c_dAGB$  (Mg ha<sup>-1</sup>) y coordenadas geográficas (grados decimales) de los sitios de muestreo donde se ubica la especie. Las variables bioclimáticas (19) se obtuvieron de la base de datos WorldClim versión 2.0 (Hijmans, 2024), a una resolución espacial de 30 segundos de arco y del periodo de 1970 a 2000, en este caso el termino bioclimáticas se utiliza debido a que las variables climáticas se derivan de los valores mensuales de temperatura y precipitación para generar variables que influyen de manera directa sobre las cuestiones biológicas.

### 3.2. Análisis estadístico

#### 3.2.1. Correlación bayesiana

Las coordenadas geográficas de cada sitio se transformaron en objetos espaciales utilizando la librería `sf` (Pebesma, 2018). El valor de cada variable bioclimática de cada sitio se extrajo de los raster de WorldClim utilizando la librería `terra` (Hijmans, 2024). Después, las variables fueron transformadas a rangos para calcular la correlación bayesiana de Spearman ( $\rho^{\text{Bayes}}$ ) entre  $\text{cdAGB}$  y cada variable bioclimática utilizando la librería `BayesFactor` (Morey, et al., 2025). Además, de la mediana de la distribución posterior, se calcularon los intervalos creíbles (CI), la probabilidad de dirección (pd), la región de equivalencia práctica en porcentaje (% en ROPE) y el Factor de Bayes (BF).

Utilizando Random Forest (RF) con el 100 % de los datos y la métrica de Mean Decrease in Gini –implementado en la librería `caret` (Kuhn et al. 2008)–, se calculó la importancia relativa de las variables bioclimáticas en la predicción de  $\text{cdAGB}$ .

#### 3.3. Análisis de punto de inflexión y mapeo

El punto de inflexión o de quiebre ( $\psi$ ), entre la variable bioclimática más importante (determinada con RF) y  $\text{cdAGB}$ , se identificó: i) un modelo loess, usando la librería `car` (Fox et al., 2019) para encontrar el cambio de signo o  $\psi$  con la segunda derivada ( $f''(x)$ ) de la función; ii) la regresión segmentada, entre la variable bioclimática más importante y  $\text{cdAGB}$ , utilizando la prueba de Davies para identificar un punto de inflexión (Test (0,~x) de la librería `segmented` (Muggeo, 2003)). Después, el modelo se ajustó mediante la función `segmented()`, que estima los parámetros de cada segmento y punto de quiebre entre ellos.

El modelo de regresión segmentada se expresa como:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 (x - \psi) I(x > \psi) + \epsilon$$

Donde:

$y = \text{cdAGB}$  ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ).  $x$  = la variable independiente (variable bioclimática).  $\beta_0$  = la intersección.  $\beta_1$  = la pendiente del primer segmento.  $\beta_2$  = el cambio en la pendiente en el punto de quiebre.  $\psi$  = el punto de quiebre.  $I(x > \psi)$  = la función indicadora que es 1 si  $x > \psi$  y 0 en caso

contrario.  $\epsilon$  = el error aleatorio. La función indicadora  $I(x > \psi)$  permite introducir el cambio de pendiente en el modelo cuando la variable independiente supera el valor  $\psi$ , que corresponde al punto de inflexión o cambio de régimen en la relación entre las variables.

La hipótesis nula ( $H_0$ ) estableció que no hay  $\psi$ ; es decir, que las pendientes antes y después de  $\psi$  eran iguales ( $\beta_1 = \beta_2$ ). La hipótesis alternativa ( $H_1$ ) postuló que sí había  $\psi$ , lo que implicó que las pendientes eran diferentes ( $\beta_1 \neq \beta_2$ ).

En caso de rechazar  $H_0$ , los datos de la variable bioclimática ( $x$ ) fueron clasificados en dos categorías: a) Vulnerables (V), sitios donde  $x < \psi$ ; y b) No Vulnerables (N-V), sitios donde  $x > \psi$ , en función de la significancia estadística ( $p < 0.05$ ) de la pendiente en la regresión segmentada. Después, los sitios fueron espacializados, mediante un Mapa de Vulnerabilidad en un Sistema de Información Geográfica (SIG) bajo el uso las librerías `ggplot2` (Wickham et al., 2025) y `sf` (Pebesma, 2018).

### **3.4. Distribución geográfica y estructural de la vulnerabilidad**

Para evaluar si existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los grupos V y N-V en altitud (msnm), latitud y longitud (grados decimales, °) y  $cdAGB$  ( $Mg\ ha^{-1}$ ), se realizaron pruebas paramétricas (prueba t de Student) –verificando el cumplimiento de Normalidad (Shapiro-Wilk) y de Homogeneidad de varianza (Levene) (Baldwin et al., 2012)–. De no satisfacerse estos supuestos, se empleó la prueba no paramétrica (Mann-Whitney U), a través del paquete `car` (Fox et al., 2019).

#### 4. RESULTADOS

De acuerdo a los datos del INFyS, *Q. magnoliifolia* fue la especie que presentó el mayor número de árboles inventariados ( $n = 12,230$ ) en 423 sitios, mientras que *Q. radiata* fue la del menor número ( $n = 143$ ) en 21 sitios. Por otro lado, *P. oocarpa* registró el mayor número de árboles ( $n = 6,735$ ) en 419 sitios *P. devoniana* el de menor cantidad con 966 árboles en 96 sitios (Cuadro 1). Similarmente, otros estudios han evaluado hasta 4,575 árboles para examinar los factores que influyen en el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea (Balima et al., 2021). Por el contrario, otros autores como García et al. (2024) utilizaron solo 37 sitios de 1,000 m<sup>2</sup> para cuantificar la densidad de carbono.

La especie que presentó mayor  $\rho_{AGB}$  fue *P. patula* con 49.1 Mg ha<sup>-1</sup> y la de menor *Q. radiata* con 2.7 Mg ha<sup>-1</sup>, pero en promedio por género, fueron de 23.75 y 13.21 Mg ha<sup>-1</sup> para *Pinus* y *Quercus*, respectivamente. Girón et al. (2024) describieron que *P. patula* presenta 53.59 Mg C ha<sup>-1</sup> en los sitios del INFyS del año 2009-2014. Cartus et al. (2014) generaron un mapa de la densidad de carbono sobre el suelo y de acuerdo con los resultados obtenidos, las densidades de carbono son  $> 50$  Mg ha<sup>-1</sup> y se encuentran ubicadas en el Eje Neovolcanica Transmexicano y la Sierra Madre del Sur. Esto concuerda con los valores que se obtuvieron en este estudio, ya que las especies utilizadas presentaron su mayor distribución sobre estas áreas. En otros países, los bosques de hoja acicular perenne del noroeste de Eurasia y el oeste de Norteamérica, presentaron un promedio de acumulación de biomasa aérea de  $42.9 \pm 46.76$  Mg ha<sup>-1</sup> (Chen et al., 2023).

Cuadro 1. Información dasométrica de 12 especies del bosque templado de México, para el análisis de vulnerabilidad de la densidad de carbono con variables bioclimáticas.

Especie	Sitios	n	DN			HT			cdAGB		
			Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
<i>P. devoniana</i>	96	966	8.6	59.8	29.4	3.9	32.0	14.1	0.1	98.2	19.4
<i>P. douglasiana</i>	89	1096	8.3	59.8	26.6	5.6	39.6	14.9	0.2	112.6	19.5
<i>P. leiophylla</i>	651	6258	7.8	59.7	19.7	0.9	27.8	9.3	0.1	83.8	5.7
<i>P. oocarpa</i>	419	6735	8.1	54.6	26.8	4.2	36.5	12.7	0.1	121.8	19.6
<i>P. patula</i>	66	1765	8.5	57.9	26.4	4.5	29.6	15.4	0.1	254.7	49.1
<i>P. pseudostrobus</i>	157	4064	8.5	57.6	26.2	2.2	35.2	15.1	0.1	135.4	29.2
<i>Q. crassifolia</i>	441	9081	7.7	54.0	18.0	2.3	22.8	7.1	0.2	87.3	12.1
<i>Q. laurina</i>	169	2377	7.6	46.9	20.4	3.4	25.1	9.7	0.2	118.6	17.7
<i>Q. magnoliifolia</i>	423	12230	7.9	50.6	19.8	0.7	25.0	7.8	0.2	92.1	19.7
<i>Q. radiata</i>	21	143	7.9	24.2	14.7	2.9	11.9	5.3	0.1	9.2	2.7
<i>Q. resinosa</i>	248	7253	7.6	54.3	19.4	2.4	16.3	7.7	0.1	71.3	16.0
<i>Q. rugosa</i>	609	11112	7.6	57.1	17.7	0.5	23.4	7.2	0.0	68.7	11.1

n: número de árboles; DN: Diámetro normal (cm); HT: altura total (m); cdAGB (Mg ha<sup>-1</sup>): densidad de carbono de la biomasa viva aérea (Mg ha<sup>-1</sup>).

#### 4.1. Correlaciones bayesianas de la densidad de carbono: clima y especies

Con base a los resultados de la correlación bayesiana, la respuesta de cdAGB a las variables bioclimáticas fue compleja; fue tanto positiva como negativa e indistinto a la especie (Figura 1). Esto ya se ha demostrado por Stegen et al. (2011) y Girón et al. (2024) quienes indicaron que las correlaciones entre la biomasa y variables climáticas son inconsistentes en los diferentes tipos de bosques y especies.

De las correlaciones entre cdAGB y bios, con un porcentaje de ROPE  $\leq 5\%$ , se identificaron 23 negativas (10 % del total) y 32 positivas (14 %); 45 correlaciones estuvieron asociadas con temperatura y solo 10 con precipitación. Se ha encontrado que, en bosques de coníferas, a escala global y regional existe una relación positiva entre cdAGB y temperatura media anual MAT y con temperaturas inferiores a 8 °C (Ali et al., 2020; Chen et al., 2023; Liu et al., 2014; Reich et al., 2014). Sin embargo, Ma et al. (2023) y Zhang et al. (2023) indican que la temperatura media anual (MAT) presenta una relación negativa con la biomasa aérea en los bosques de

coníferas en China. Se menciona en la literatura que las correlaciones entre el  $\text{cdAGB}$  y la precipitación parecen ser más consistentes, lo que evidencia una relación positiva (Balima et al., 2021; García et al., 2024; Ma et al., 2023; Zhang et al., 2023), y en general no se supera el valor de 0.37.

Las tres especies que presentaron mayor promedio de correlación absoluta (incluyendo todas las bios) ( $|\rho^{\text{Bayes}}|$ ) de  $\text{cdAGB}$  fueron *P. douglasiana* (0.25), *Q. resinosa* (0.23) y *Q. rugosa* (0.17). Mientras que las de menor correlación absoluta fueron  $\rho^{\text{Bayes}} = 0.06$  para *P. devoniana*,  $\rho^{\text{Bayes}} = 0.12$  para *P. leiophylla* y *P. oocarpa* y  $\rho^{\text{Bayes}} = 0.13$  en *Q. laurina*, la baja correlación encontrada puede asociarse a factores geográficos como los rangos de distribución altitudinal los cuales son;  $R = 2111$  msnm para *P. devoniana*,  $R = 1987$  msnm para *P. leiophylla*,  $R = 2403$  msnm para *P. oocarpa* y  $R = 2867$  en *Q. laurina*. Una mayor correlación implica una mayor sensibilidad y vulnerabilidad de las especies al cambio climático, y viceversa.

En general, las correlaciones entre clima y bios fueron de esta magnitud. Datos similares fueron reportados por Girón et al. (2024) para *P. leiophylla* ( $\rho_{\text{Bayes}} = 0.17$ ) y *P. oocarpa* ( $\rho_{\text{Bayes}} = 0.17$ ) entre biomasa aérea y bios. Por otro lado Sandoval et al. (2024) mencionan que las variables de temperatura son más importantes que las de precipitación, en relación con la densidad de carbono aéreo.

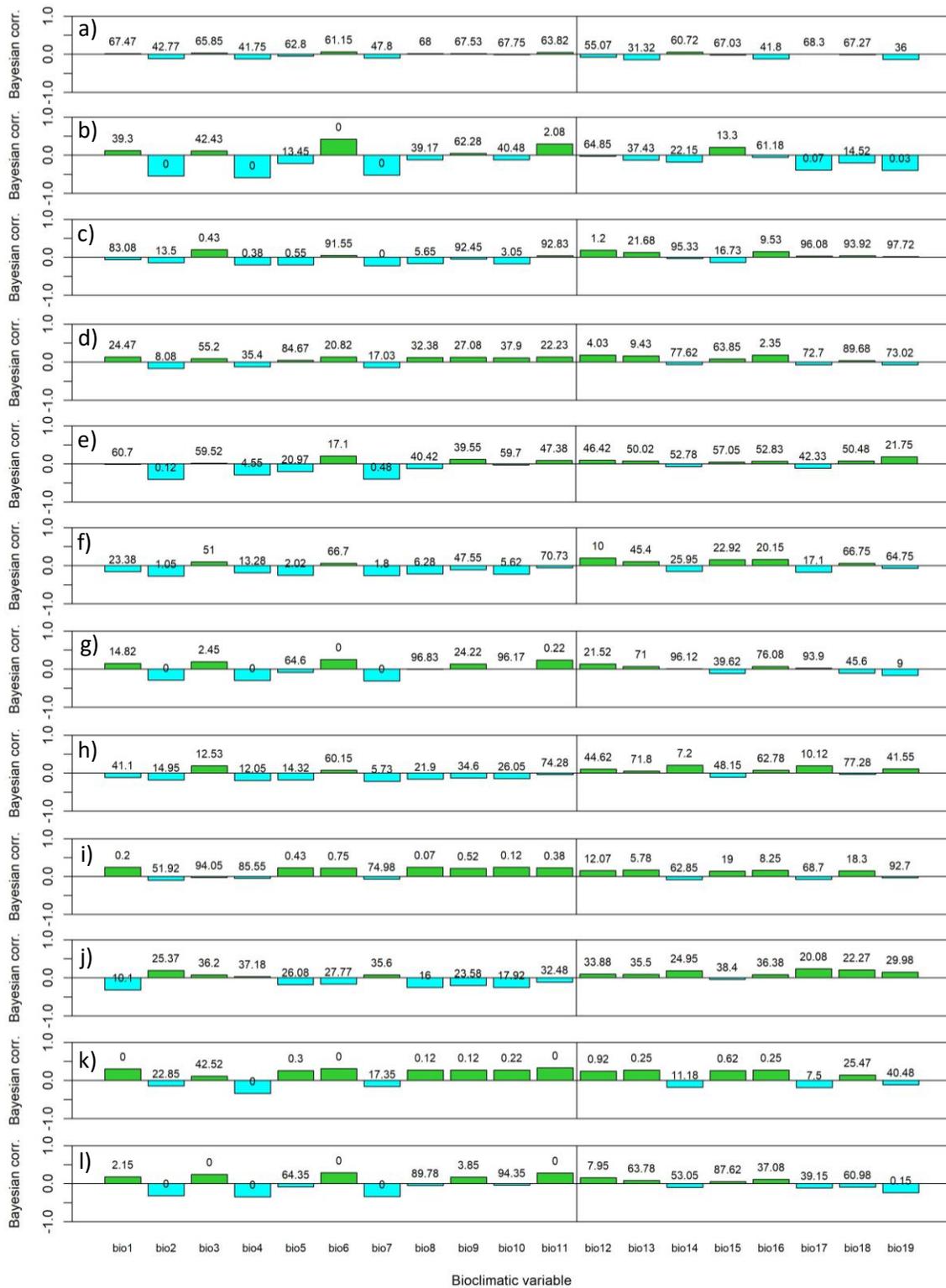


Figura 1. Correlación bayesiana entre 19 variables bioclimáticas y la densidad de carbono de la biomasa viva aérea en 12 especies de bosque templado de México. La línea vertical separa los bios de temperatura a la izquierda y de precipitación a la derecha. Barras azules representan

correlación negativa y, verdes correlación positiva. El valor sobre cada barra indica el % en ROPE (Región de Equivalencia Práctica). a): *P. devoniana*; b): *P. douglasiana*; c): *P. leiophylla*; d): *P. oocarpa*; e): *P. patula*; f): *P. pseudostrobus*; g): *Q. crassifolia*; h): *Q. laurina*; i): *Q. magnoliifolia*; j): *Q. radiata*; k): *Q. resinosa* y l): *Q. rugosa*.

#### 4.2. Importancia de las variables bioclimáticas

La estacionalidad de la temperatura (bio4) fue la variable de mayor importancia relativa para predecir  $_{cd}AGB$  (Figura 2). Se registró 100 % en cuatro especies (*P. douglasiana*, *P. leiophylla*, *Q. crassifolia* y *Q. resinosa*). Esta variable ha sido utilizada en modelos para predecir biomasa aérea y su relación es inversamente proporcional (Chave et al., 2014), y en algunos estudios presenta hasta 68 % de importancia relativa (Vieilledent et al., 2016), seguida de bio12 (49 %) y bio1 (48 %) para la predicción de biomasa aérea AGB.

El rango anual de temperatura (bio7) fue la segunda variable más importante con 100 % para tres especies (*P. oocarpa*, *P. patula* y *Q. resinosa*) (Figura 2). Otros autores, como Bennett et al. (2020) encontraron que bio9 es la variable más importante para estimar AGB, mientras que Wang et al. (2022) demostraron que bio1 presenta una importancia relativa del 13.74 % para estimar AGB en 76 metacomunidades forestales mundiales.

Por el contrario, la precipitación del mes más seco (bio14) fue la variable que mostró menor valor de importancia (0 %) en 8 de 12 especies (Figura 2), seguida la precipitación del trimestre más seco (bio17). No obstante, los predictores de  $_{cd}AGB$  son dependientes del tipo de bosque, especie, escala, etc., y en muchos casos no se evalúa esta métrica. Por ejemplo, Stegen et al. (2011) evidencian que bio17 predice adecuadamente la AGB de bosques templados ( $r= 0.44$ ), pero otros autores como Chen et al. (2023) indican que bio12 es buen predictor de AGB de bosques caducifolios y perennifolios de hoja ancha, de forma positiva y negativa respectivamente.

Otros autores como Sandoval et al. (2024) han encontrado que la temperatura máxima del mes más cálido (bio5) predice mejor la densidad de carbono en bosques de coníferas. También, Girón et al. (2024) describieron que algunas especies (*P. oocarpa* y *P. pseudostrobus*) llegan a presentar las más altas productividades en biomasa bajo condiciones climáticas de temperatura (bio1 y bio5).

En promedio, la diferencia entre la primera y la segunda variable de mayor importancia relativa en las 12 especies estudiadas fue del 20.45 %, lo que da mayor certeza sobre la selección de la primera bio como la de mayor importancia relativa. Aunque bio12 no fue la variable más importante para predecir  $cdAGB$ , en las especies de este estudio, se ha encontrado que esta se correlaciona positivamente en los árboles de Burkina Faso, en selvas tropicales y en los bosques templados de Durango (Balima et al., 2021; Ma et al., 2023; García et al., 2024), mientras que bio1 se correlaciona tanto positivo como negativamente en los bosques a nivel mundial (Liu et al., 2014; Reich et al., 2014; Ma et al., 2023).

*Pinus patula* < *P. devoniana* < *Q. radiata* (Figura 2, izquierda) muestran un promedio bajo de importancia relativa con las 19 variables (25.4%) en la predicción de  $cdAGB$  según RF. En contraste, el grupo de especies de *Q. magnoliifolia* > *P. pseudostrobus* > *Q. rugosa* > *P. oocarpa* (Figura 2, derecha), muestran un alto valor de importancia relativa (promedio de 61.1 %), siendo esta otra forma de evidenciar la susceptibilidad de las especies (en ese orden) al cambio climático, al mostrar alto valor de importancia a todas las bios. Guitérrez et al. (2014) advierten que *Quercus laurina*, aunque tolera un amplio rango de condiciones ambientales, podría sufrir una disminución de hasta el 48 % en su área de distribución potencial, lo que sugiere una alta vulnerabilidad de la especie ante los efectos del cambio climático.

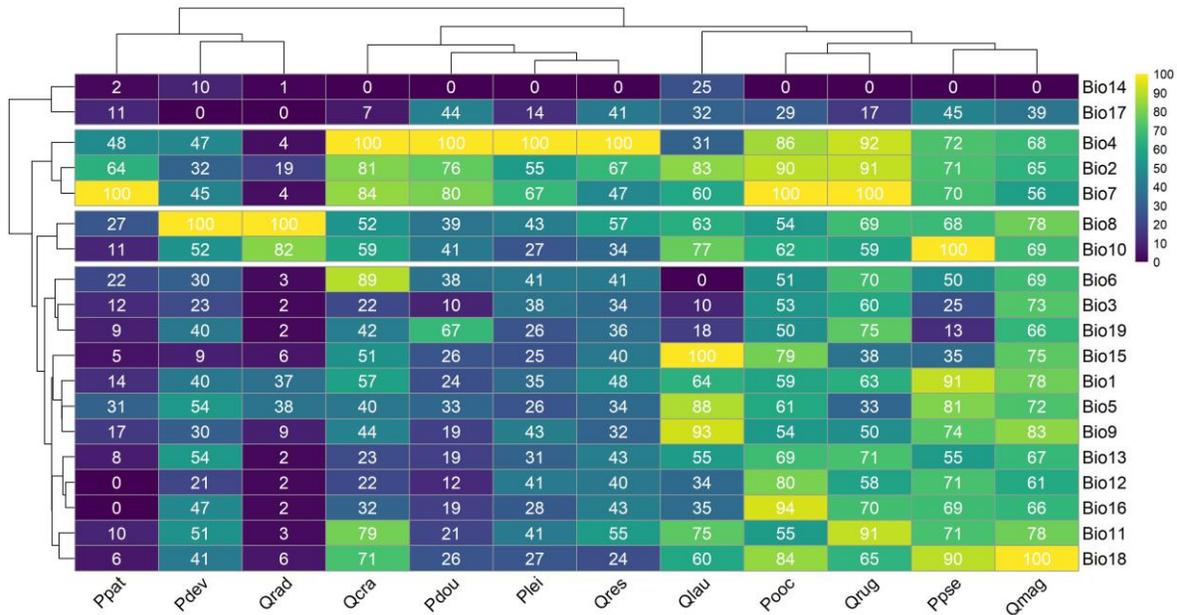


Figura 2. Importancia relativa de 19 variables bioclimáticas para predecir la densidad de carbono de la biomasa viva aérea en 12 especies de bosques templados de México. Dentro de cada celda se indica el valor de importancia con base a un modelo de Random Forest. De izquierda a derecha: *P. patula*, *P. devoniana*, *Q. radiata*, *Q. crassifolia*, *P. douglasiana*, *P. leiophylla*, *Q. resinosa*, *Q. laurina*, *P. oocarpa*, *Q. rugosa*, *P. pseudostrobus* y *Q. magnoliifolia*.

### 4.3. Umbrales de vulnerabilidad en especies de *Pinus* y *Quercus*

En total, nueve de las 12 especies analizadas (cuatro pinos y cinco encinos) presentaron un umbral bioclimático entre  $cdAGB$  y la bio más importante para la especie. Únicamente *P. devoniana*, *P. oocarpa* y *Q. laurina* (Figura 3; incisos a, d y h) no presentaron umbral bioclimático.

Los resultados muestran una tendencia negativa de  $-43.470$  (*P. patula*) hasta  $-0.049$   $Mg\ ha^{-1}$  (*Q. crassifolia*) de la pendiente de regresión en el primer segmento ( $p < 0.05$ ), para cuatro de las seis especies del género *Pinus* (*P. douglasiana*, *P. leiophylla*, *P. patula* y *P. pseudostrobus*) (Figura 3; incisos b, c, e y f) y dos del género *Quercus* (*Q. magnoliifolia* con cambio positivo y *Q. radiata* negativo) (Figura 3; incisos i) y j).

En el segundo segmento, el cambio de pendiente se observó en tres especies de *Quercus* (*Q. crassifolia*, *Q. resinosa* y *Q. rugosa*) (Figura 3; incisos: g) k) y l), con valor negativo para las tres (con  $-7.1766$ ,  $-5.3996$  y  $-6.4206$   $Mg\ ha^{-1}$ ).

Los valores del “best” de acuerdo con el método de Davies y la segunda derivada son diferentes entre sí al mostrar una correlación lineal (Pearson) de  $r = 0.54$ . En solo tres de las nueve especies, *P. patula* ( $best = 16.433$  y la  $f''(x)' = 17.800$ ), *Q. radiata* ( $best = 14.698$  y la  $f''(x)' = 15.000$ ) y *Q. rugosa* ( $best = 20.767$  y la  $f''(x)' = 19.000$ ) la similitud fue mayor con una correlación de  $r = 0.89$ . Por el contrario, las seis especies restantes: *P. douglasiana*, *P. leiophylla*, *P. pseudostrobus*, *Q. crassifolia*, *Q. magnoliifolia* y *Q. resinosa* mostraron una correlación baja de  $r = 0.31$ , lo que indicó que las diferencias son más significativas entre en *best* y la segunda derivada. Aunque ambos métodos son válidos, se optó por utilizar el método de Davies para la interpretación de los resultados en virtud de usar pruebas de hipótesis.

Se ha examinado la vulnerabilidad de 34 especies en encinos y pinos en México encontrando que la distribución geográfica actual de los encinos disminuiría entre un 7 % y un 48 %, y la de los pinos entre un 0.2 % y un 64 %. Esto depende del escenario de cambio climático (Gómez et al, 2007). Por otro lado, en Vieilledent et al. (2016) identificaron el punto de inflexión climático con valores de precipitación anual menores de 1100 mm y temperaturas medias anuales mayores de 21 °C, ya que la densidad de carbono aéreo forestal disminuye drásticamente por debajo de estos umbrales.

Cuadro 2. Prueba de Davies para determinar cambios en pendientes entre  $cdAGB$  y variables bioclimáticas en nueve especies de bosques templados de México en relación con la variable de mayor importancia.

Espece	Bio <sub>mi</sub>	Valor p	P   % V	Best	$f''(x)'$	Est.	Valor t
<i>Pdou</i>	bio4	0.051	83.150   83.150	322.060	161.440	-0.158 <sup>1</sup>	-3.431
<i>Plei</i>	bio4	0.000	13.670   13.670	299.830	510.281	-0.126 <sup>1</sup>	-6.067
<i>Ppat</i>	bio7	0.000	24.240   27.270	16.433	17.800	-43.470 <sup>1</sup>	-4.175
<i>Ppse</i>	bio10	0.050	1.270   88.540	21.330	14.083	-3.4591 <sup>1</sup>	-3.7042
<i>Qcra</i>	bio4	0.068	30.840   89.570	137.550	189.417	-0.049 <sup>2</sup>	-7.177
<i>Qmag</i>	bio18	0.052	99.290   95.040	904.560	227.000	0.017 <sup>1</sup>	3.522
<i>Qrad</i>	bio8	0.007	23.810   23.810	14.698	15.000	-11.020 <sup>1</sup>	-3.646
<i>Qres</i>	bio4	0.050	13.310   86.690	180.210	171.475	-0.106 <sup>2</sup>	-5.400
<i>Qrug</i>	bio7	0.391	23.480   76.520	20.767	19.000	-0.953 <sup>2</sup>	-6.421

Best: Umbral estimado por Davies,  $f''$ : umbral estimado a través de la segunda derivada, Est: Pendiente, P | % V: Percentil y porcentaje de datos vulnerables, *Pdou*: *Pinus douglasiana*, *Plei*: *Pinus leiophylla*, *Pat*: *Pinus patula*,

*Ppse*: *Pinus pseudostrobus*, *Qcra*: *Quercus crassifolia*, *Qmag*: *Quercus magnoliifolia*, *Qrad*: *Quercus radiata*, *Qres*: *Quercus resinosa*, *Qrug*: *Quercus rugosa*, bio4: Estacionalidad de la temperatura (%), bio7: Rango anual de temperatura (%), bio10: Temperatura media del trimestre más cálido (°C), bio18: Precipitación del trimestre más cálido (mm), bio8: Temperatura media del trimestre más húmedo (°C) y subíndice 1 y 2: primer y segundo segmento.

En otros estudios, se han demostrado que la temperatura media del trimestre más cálido (bio10) es una variable clave para la distribución idónea de *Pinus hartwegii* en México, ya que a medida que aumenta la temperatura el área de idoneidad de la especie se reduce. Esto disminuye por consiguiente la biomasa área forestal (Alfaro et al., 2020) y uno positivo (bio18 de precipitación), lo que indica la presencia de un umbral de vulnerabilidad de estas especies frente al cambio climático.

Desde hace varios años, Villers et al. (1997) mencionaron que las zonas templadas de México son las más vulnerables, con riesgos de reducción drástica o desaparición de sus bosques en todos los escenarios climáticos. Se prevé que, si el sur de Estados Unidos se vuelve climáticamente inadecuado, 130 especies de árboles de bosque templado presentarán una posible reducción en la biomasa forestal total de no ser reemplazados por otras de igual o mayor biomasa (McKenney et al., 2007). Los bosques históricos de la Tierra son especialmente vulnerables, ya que su persistencia y prosperidad futura dependen de condiciones ecológicas que son cada vez más amenazadas, pero tendrán que adaptarse con mayor rapidez; aun cuando el ritmo de cambio climático supere la capacidad de adaptación o aclimatación es probable que se produzcan nuevas mortandades e incluso que algunos bosques dejen de existir (Hammond et al., 2022). En otros estudios Larjavaara et al. (2021) encontraron que con el aumento de la temperatura se tendrá un impacto drástico en la biomasa aérea de los bosques primarios, con una disminución del 41 % en los trópicos y del 29 % a nivel mundial.

Al igual que en este estudio, Girón et al. (2024) mencionan que para la especie de *Pinus devoniana* no encontraron correlaciones significativas entre la densidad de carbono y las variables bioclimáticas (ambos estudios utilizan datos del INFyS de diferentes años), lo cual se interpreta en que la  $_{cd}AGB$  no se verá afectada por las variaciones que puedan llegar a presentarse en la variable de importancia, sin embargo, en estudios de distribución de especies Gómez et al. (2007) describen que el *Pinus oocarpa* bajo un escenario severo presentará una disminución del 50 % mientras que bajo el escenario conservador será de un 50.4 % .

En el caso de *Q. crassifolia* (inciso g), la  $_{cd}AGB$  disminuyó 7.1766 ( $Mg\ ha^{-1}$ ) por cada porcentaje de la estacionalidad de la temperatura (bio4), le siguió *Q. rugosa* con un valor de -6.4206 ( $Mg\ ha^{-1}$ ) en relación con el rango anual de temperatura (bio7) (Figura 3, inciso g y l); ambas especies presentaron el cambio en el segundo segmento de la regresión. Para *P. leiophylla*, el primer segmento presentó una disminución en la  $_{cd}AGB$  de 6.0672 ( $Mg\ ha^{-1}$ ) en cada porcentaje de bio4 (inciso c) (Figura 3). Wang (2022) también encontró que la biomasa aérea disminuye significativamente con una mayor temperatura media anual (MAT), con un coeficiente estandarizado ( $\beta$ ) de -0.39 ( $p < 0.001$ ), lo que mostró una relación negativa donde las temperaturas promedio anuales más altas están asociadas con una menor biomasa aérea en las metacomunidades estudiadas. Por el contrario, para el único caso de cambio positivo en el primer segmento de la pendiente se tiene que la  $_{cd}AGB$  aumentó 3.5218 ( $Mg\ ha^{-1}$ ) por cada mm de precipitación del trimestre más cálido (bio18) (Figura 3, inciso i).

En los bosques del mundo, Guo et al. (2019) indican que cuando la precipitación media anual es  $\leq 1100$  mm la relación es positiva y por cada aumento de 100 mm la densidad de carbono incrementa  $7.1\ Mg\ C\ ha^{-1}$  en este rango de precipitación, pero cuando supera los 1100 mm la relación es negativa, disminuyendo  $1.9\ Mg\ C\ ha^{-1}$  por cada 100 mm. Las tasas de incremento/decremento de densidad de carbono a escala global para la variable precipitación son de  $|\beta_1\ \text{ó}\ \beta_2 = 0.027\ Mg\ C\ ha^{-1}|$  mientras que con temperatura son de  $|\beta_1\ \text{ó}\ \beta_2 = 1.092\ Mg\ C\ ha^{-1}|$  por cada unidad de la variable, mientras que en este estudio (escala local y especie) fueron de  $|\beta_1\ \text{ó}\ \beta_2 = 0.017\ Mg\ C\ ha^{-1}|$  y  $|\beta_1\ \text{ó}\ \beta_2 = 7.418\ Mg\ C\ ha^{-1}|$ .

Por otro lado, Lie et al. (2018) sugieren que la precipitación es un factor crucial que influye en la distribución de la biomasa forestal independientemente de la edad y tipo de bosques. La precipitación anual (Bio12) y la evapotranspiración potencial, es decir, factores relacionados con la disponibilidad de agua como la lluvia y la temperatura, constituyen los principales determinantes de la biomasa aérea en los bosques tropicales del norte de Sudamérica (Álvarez et al., 2017).

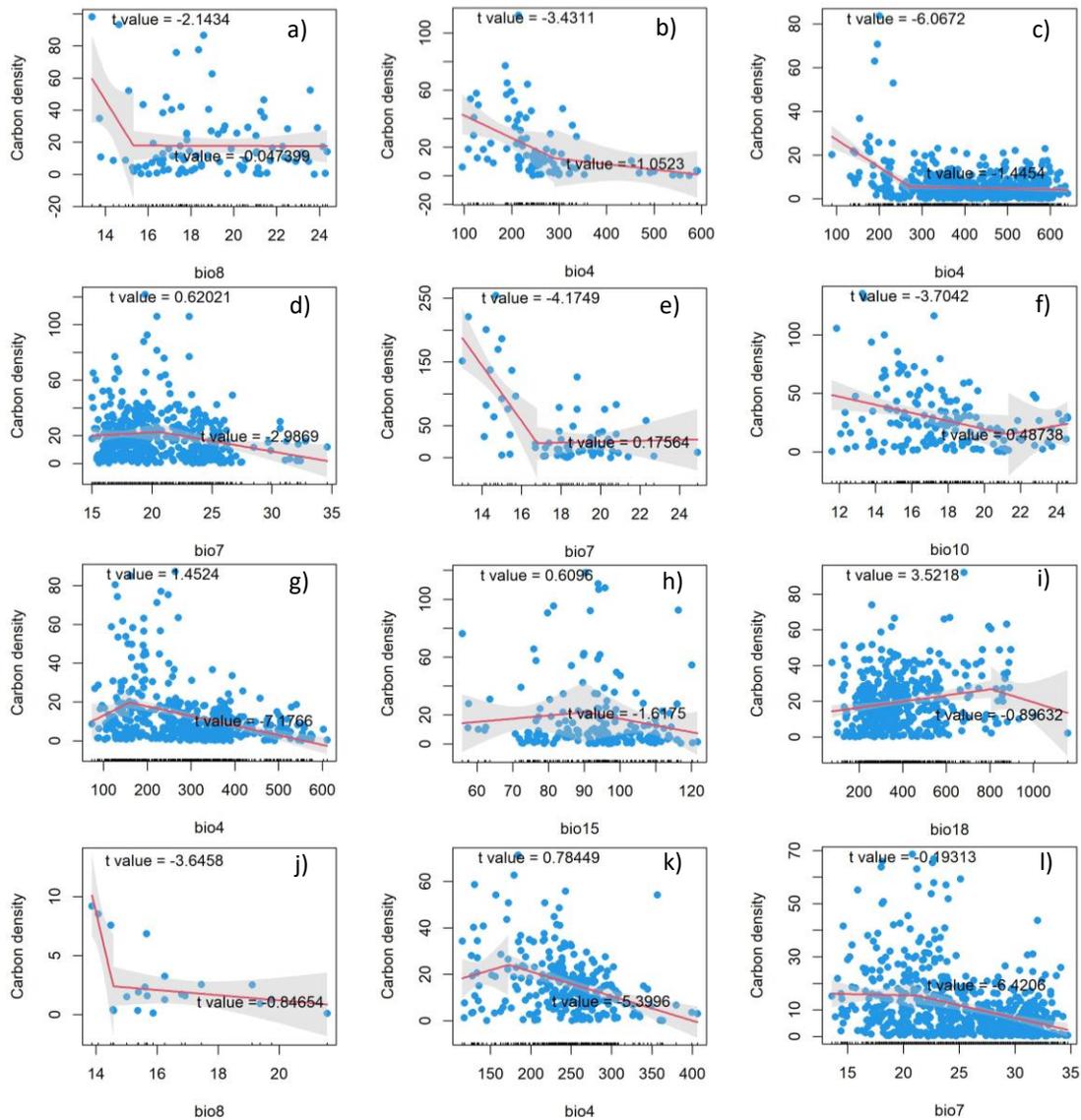


Figura 3 Prueba de Davies y regresión segmentada entre la densidad de carbono de la biomasa viva aérea y la variable bioclimática de mayor importancia, en 12 especies de bosques templados en México. Los puntos azules representan los sitios del INFyS, la línea roja corresponde al modelo ajustado de regresión segmentada y la región sombreada indica el intervalo de confianza del modelo. De la a-f corresponde a las 6 especies de coníferas y de g-l latifoliadas. *P. devoniana*, *P. douglasiana*, *P. leiophylla*, *P. oocarpa*, *P. patula*, *P. pseudostrobus*, *Q. crassifolia*, *Q. laurina*, *Q. magnoliifolia*, *Q. radiata*, *Q. resinosa* y *Q. rugosa*.

#### 4.4. Percentiles críticos y áreas de riesgo

En general, se observó que las especies del género *Quercus* presentan umbrales localizados en percentiles ligeramente más altos ( $38.15 \pm 10.08$ ) y exhiben un mayor porcentaje promedio de sitios vulnerables ( $74.33 \pm 8.91$  %) en comparación con las especies del género *Pinus*, las cuales tienen umbrales en percentiles más bajos ( $30.58 \pm 7.41$ ) y un menor porcentaje promedio de sitios vulnerables ( $53.16 \pm 9.89$  %).

A nivel de especie, *P. douglasiana* y *P. pseudostrobus* destacaron por presentar altos porcentajes de sitios vulnerables (83.15 % y 88.54 %, respectivamente), a pesar de que en *P. pseudostrobus* el umbral ocurre en un percentil muy bajo (1.27). En contraste, *P. leiophylla* presentó tanto un percentil bajo (13.67) como un porcentaje de vulnerabilidad bajo (13.67 %). Por parte de los encinos, *Q. magnoliifolia* mostró tanto el percentil más alto (99.29) como el mayor porcentaje de sitios vulnerables (95.04 %), mientras que *Q. radiata* fue la única especie de encino con valores bajos en ambos indicadores (23.81 en percentil y 23.81 % en vulnerabilidad).

#### 4.5. Contrastes ambientales entre grupos vulnerables

Con base a los resultados de las pruebas de t (paramétricas y no paramétricas) (Cuadro 3) mostraron que la vulnerabilidad de cdAGB de las especies *P. douglasiana*, *P. leiophylla*, *P. patula*, *P. pseudostrobus*, *Q. crassifolia*, *Q. magnoliifolia*, *Q. radiata*, *Q. resinosa* y *Q. rugosa*, está asociada a los factores de: altitud, latitud, longitud y carbono ( $p < 0.05$ ). Los sitios clasificados como vulnerables (Figura 4 y Figura 5) de nueve especies (superíndice “a” en la media) se encuentran en mayores altitudes (Cuadro 3).

Cartus et al. (2014) encontraron que la importancia de la elevación como predictor varía entre ecorregiones, lo que sugiere que la ubicación geográfica y la altitud asociada influyen en la distribución del carbono forestal. Sin embargo, Ullah et al. (2021) describen que la elevación tiene un efecto negativo en la biomasa aérea de los bosques templados ( $\beta = -0.32$  en el modelo de ecuaciones estructurales por partes (pSEM, por sus siglas en inglés) con tipos de bosque como efecto aleatorio y  $\beta = -0.33$  en el pSEM con mezcla de especies como efecto aleatorio).

Cuadro 3. Análisis estadístico de diferencias altitudinales entre sitios vulnerables y no vulnerables, en bosques templados de México.

Especie	Prueba <sub>n</sub>	Valor p <sub>n</sub>	BP-valor p	Prueba	t   w	Valor p	Grupo	Efecto	Media
Altitud (°)									
<i>Pdou</i>	S-W	0.371	0.818	STUDENT	-0.2	0.829	N-V	-0.06	1937.7 <sup>b</sup>
	K-S	0.967	0.818				V	1964.9 <sup>a</sup>	
<i>Plei</i>	K-S	0.000	0.636	MWU	22408.0	0.115	N-V	-0.13	2269.3 <sup>b</sup>
	K-S	0.001	0.636				V	2306.8 <sup>a</sup>	
<i>Ppat</i>	S-W	0.673	0.097	MWU	334.5	0.163	N-V	-0.35	2454.6 <sup>b</sup>
	S-W	0.002	0.097				V	2599.8 <sup>a</sup>	
<i>Ppse</i>	S-W	0.736	0.791	STUDENT	-11.90	0.000	N-V	2.90	1382.1 <sup>b</sup>
	K-S	1.000	0.791				V	2440.9 <sup>a</sup>	
<i>Qcra</i>	S-W	0.010	0.129	MWU	7722.5	0.096	N-V	0.22	2145.5 <sup>b</sup>
	K-S	0.000	0.129				V	2260.9 <sup>a</sup>	
<i>Qmag</i>	S-W	0.149	0.058	MWU	1928.0	0.000	N-V	1.07	2238.0 <sup>b</sup>
	K-S	0.000	0.058				V	2882.0 <sup>a</sup>	
<i>Qrad</i>	S-W	0.009	0.140	MWU	2.0	0.000	N-V	-1.66	2308.1 <sup>b</sup>
	S-W	0.276	0.140				V	2629.8 <sup>a</sup>	
<i>Qres</i>	S-W	0.177	0.796	MWU	2728	0.033	N-V	0.41	2326.0 <sup>b</sup>
	K-S	0.003	0.796				V	2897.0 <sup>a</sup>	
<i>Qrug</i>	K-S	0.000	0.000	MWU	25479.0	0.000	N-V	0.59	1913.2 <sup>b</sup>
	K-S	0.000	0.000				V	2282.1 <sup>a</sup>	

S-W: Shapiro-Wilk, K-S: Kolmogorov-Smirnov, Prueba<sub>n</sub>: Prueba de normalidad, Valor p<sub>n</sub>: Valor de la prueba de normalidad, BP: Breusch-Pagan, MWU: Prueba de Mann-Whitney U test no paramétrica, t|w: valor de prueba de t de Student y de Mann-Whitney U, Valor de p: Valor de la prueba, N-V: No vulnerables, V: Vulnerables, Efecto: Tamaño del efecto de Cohen, Superíndice (“a” y “b”): Grupos con diferente letra indican que son estadísticamente diferentes, *Pdou*: *Pinus douglasiana*, *Plei*: *Pinus leiophylla*, *Ppat*: *Pinus patula*, *Ppse*: *Pinus pseudostrobus*, *Qcra*: *Quercus crassiifolia*, *Qmag*: *Quercus magnoliifolia*, *Qrad*: *Quercus radiata*, *Qres*: *Quercus resinosa* y *Qrug*: *Quercus rugosa*.

Los resultados de la prueba de Mann-Whitney U demuestran que los sitios clasificados como vulnerables de cuatro especies: *P. douglasiana*, *P. leiophylla*, *P. patula* y *Q. magnoliifolia* (Figura 4 y Figura 5) se ubican hacia mayores longitudes (Cuadro 4); es decir hacia la Sierra Madre occidental (SMOc).

Cuadro 4. Análisis estadístico de diferencias longitudinales entre sitios vulnerables y no vulnerables, en bosques templados de México.

Especie	Prueba <sub>n</sub>	Valor p <sub>n</sub>	BP-valor p	Prueba	t   w	Valor p	Grupo	Efecto	Media
									Longitud (°)
<i>Pdou</i>	S-W	0.046	0.144	MWU	41.0	0.000	N-V	-1.89	-107.5 <sup>b</sup>
	K-S	0.000	0.144				V		-103.9 <sup>a</sup>
<i>Plei</i>	K-S	0.000	0.000	MWU	1658.0	0.000	N-V	-2.20	-106.8 <sup>b</sup>
	K-S	0.000	0.000				V		-102.4 <sup>a</sup>
<i>Ppat</i>	S-W	0.000	0.022	MWU	22.0	0.000	N-V	-1.71	-98.5 <sup>b</sup>
	S-W	0.006	0.022				V		-96.7 <sup>a</sup>
<i>Ppse</i>	S-W	0.033	0.140	MWU	1160.0	0.618	N-V	0.33	-95.7 <sup>a</sup>
	K-S	0.000	0.140				V		-96.4 <sup>b</sup>
<i>Qcra</i>	S-W	0.000	0.001	MWU	16673.0	0.000	N-V	-2.23	-97.3 <sup>a</sup>
	K-S	0.000	0.001				V		-103.9 <sup>b</sup>
<i>Qmag</i>	S-W	0.512	0.000	MWU	1621.0	0.056	N-V	1.19	-104.4 <sup>b</sup>
	K-S	0.000	0.000				V		-92.3 <sup>a</sup>
<i>Qrad</i>	S-W	0.034	0.075	MWU	25.0	0.240	N-V	0.22	-104.3 <sup>a</sup>
	S-W	0.791	0.075				V		-104.9 <sup>b</sup>
<i>Qres</i>	S-W	0.019	0.000	MWU	6631	0.000	N-V	-2.12	-92.6 <sup>a</sup>
	K-S	0.000	0.000				V		-99.7 <sup>b</sup>
<i>Qrug</i>	K-S	0.000	0.008	MWU	65139.0	0.000	N-V	-3.10	-96.6 <sup>a</sup>
	K-S	0.000	0.008				V		-105.2 <sup>b</sup>

S-W: Shapiro-Wilk, K-S: Kolmogorov-Smirnov, Prueba<sub>n</sub>: Prueba de normalidad, Valor p<sub>n</sub>: Valor de la prueba de normalidad, BP: Breusch-Pagan, MWU: Prueba de Mann-Whitney U test no paramétrica, t|w: valor de prueba de t de Student y de Mann-Whitney U, Valor de p: Valor de la prueba, N-V: No vulnerables, V: Vulnerables, Efecto: Tamaño del efecto de Cohen, Superíndice (“a” y “b”): Grupos con diferente letra indican que son estadísticamente diferentes, *Pdou*: *Pinus douglasiana*, *Plei*: *Pinus leiophylla*, *Ppat*: *Pinus patula*, *Ppse*: *Pinus pseudostrobus*, *Qcra*: *Quercus crassifolia*, *Qmag*: *Quercus magnoliifolia*, *Qrad*: *Quercus radiata*, *Qres*: *Quercus resinosa* y *Qrug*: *Quercus rugosa*.

Los sitios clasificados como vulnerables de las nueve especies se encuentran en latitudes más bajas (*P. douglasiana*, *P. leiophylla*, *P. patula* y *Q. radiata*) y las cinco restantes están en mayor latitud (*P. pseudostrobus*, *Q. crassifolia*, *Q. magnoliifolia*, *Q. resinosa* y *Q. rugosa* (Figura 4 y Figura 5)). En otro estudio han encontrado que la biomasa aumenta de manera significativa en latitudes medias que van desde los 30° hasta los 75° (Lin et al., 2010), lo cual es similar a lo encontrado en este estudio puesto que los valores de mayor latitud presentan mayor biomasa (Cuadro 5).

Cuadro 5. Análisis estadístico de diferencias latitudinales entre sitios vulnerables y no vulnerables, en bosques templados de México.

Especie	Prueba <sub>n</sub>	Valor p <sub>n</sub>	BP-valor p	Prueba	t   w	Valor p	Grupo	Efecto	Media
Latitud (°)									
<i>Pdou</i>	S-W	0.508	0.355	MWU	1082.0	0.000	N-V	2.55	27.2 <sup>a</sup>
	K-S	0.000	0.355				V	21.3 <sup>b</sup>	
<i>Plei</i>	K-S	0.000	0.047	MWU	49073.0	0.000	N-V	2.96	26.8 <sup>a</sup>
	K-S	0.000	0.047				V	20.7 <sup>b</sup>	
<i>Ppat</i>	S-W	0.003	0.028	MWU	847.0	0.000	N-V	2.95	19.8 <sup>a</sup>
	S-W	0.310	0.028				V	17.3 <sup>b</sup>	
<i>Ppse</i>	S-W	0.024	0.002	MWU	1598.0	0.056	N-V	-0.79	27.7 <sup>b</sup>
	K-S	0.000	0.002				V	28.4 <sup>a</sup>	
<i>Qcra</i>	S-W	0.197	0.000	MWU	715.0	0.000	N-V	2.76	16.9 <sup>b</sup>
	K-S	0.000	0.000				V	23.5 <sup>a</sup>	
<i>Qmag</i>	S-W	0.187	0.000	MWU	4890.0	0.221	N-V	-0.20	22.4 <sup>b</sup>
	K-S	0.000	0.000				V	29.6 <sup>a</sup>	
<i>Qrad</i>	S-W	0.385	0.050	STUDENT	0.2	0.881	N-V	0.10	23.7 <sup>a</sup>
	S-W	0.054	0.050				V	23.5 <sup>b</sup>	
<i>Qres</i>	S-W	0.013	0.080	MWU	27.0	0.000	N-V	2.64	19.6 <sup>b</sup>
	K-S	0.005	0.080				V	26.6 <sup>a</sup>	
<i>Qrug</i>	K-S	0.000	0.000	MWU	1878.0	0.000	N-V	2.75	17.6 <sup>b</sup>
	K-S	0.000	0.000				V	24.7 <sup>a</sup>	

S-W: Shapiro-Wilk, K-S: Kolmogorov-Smirnov, Prueba<sub>n</sub>: Prueba de normalidad, Valor p<sub>n</sub>: Valor de la prueba de normalidad, BP: Breusch-Pagan, MWU: Prueba de Mann-Whitney U test no paramétrica, t|w: valor de prueba de t de Student y de Mann-Whitney U, Valor de p: Valor de la prueba, N-V: No vulnerables, V: Vulnerables, Efecto: Tamaño del efecto de Cohen, Superíndice (“a” y “b”): Grupos con diferente letra indican que son estadísticamente diferentes, *Pdou*: *Pinus douglasiana*, *Plei*: *Pinus leiophylla*, *Ppat*: *Pinus patula*, *Ppse*: *Pinus pseudostrobus*, *Qcra*: *Quercus crassifolia*, *Qmag*: *Quercus magnoliifolia*, *Qrad*: *Quercus radiata*, *Qres*: *Quercus resinosa* y *Qrug*: *Quercus rugosa*.

En el caso de C (Mg ha<sup>-1</sup>), los sitios vulnerables de siete especies presentaron los mayores valores promedio de carbono y van desde 5.2 (Mg ha<sup>-1</sup> en *Q. radiata*) hasta 135.4 (Mg ha<sup>-1</sup> para *P. pseudostrobus*) (Figura 4 y Figura 5 Cuadro 6). Pocos son los estudios que hacen estos análisis de nivel especie, por ejemplo, en Girón et al. (2024) los montos para *P. pseudostrobus* presentan un promedio de 9.01 Mg ha<sup>-1</sup> y un máximo de 99.78 Mg ha<sup>-1</sup> que fueron diferentes a los encontrados en este estudio: esto puede atribuirse a que utilizaron datos del INFyS de 2009-2014. Sin embargo, cuando se incluyen todas las especies, los montos de carbono de las densidades promedio oscilan entre 47.82 y 67.95 Mg ha<sup>-1</sup> en sitios forestales (Balima et al.,

2021). Además, en el estudio de García et al. (2024) también encontraron una correlación positiva ( $r = 0.72$ ), entre el almacenamiento de carbono de bosques templados y la altitud.

Cuadro 6. Análisis estadístico de diferencias de densidad de carbono de la biomasa viva aérea entre sitios vulnerables y no vulnerables, en bosques templados de México.

Especie	Prueba <sub>n</sub>	Valor p <sub>n</sub>	BP-valor p	Prueba	t   w	Valor p	Grupo	Efecto	Media
C (Mg ha <sup>-1</sup> )									
<i>Pdou</i>	S-W	0.000	0.049	MWU	261.0	0.001	N-V	-0.84	7.5 <sup>b</sup>
	K-S	0.000	0.049				V	21.9 <sup>a</sup>	
<i>Plei</i>	K-S	0.000	0.000	MWU	15195.0	0.000	N-V	-0.66	4.7 <sup>b</sup>
	NO	0.000	0.000				V	11.8 <sup>a</sup>	
<i>Ppat</i>	S-W	0.000	0.000	MWU	107.0	0.000	N-V	-1.66	24.1 <sup>b</sup>
	S-W	0.796	0.000				V	115.9 <sup>a</sup>	
<i>Ppse</i>	S-W	0.182	0.098	MWU	1028.0	0.220	N-V	0.49	48.8 <sup>b</sup>
	K-S	0.000	0.098				V	135.4 <sup>a</sup>	
<i>Qcra</i>	S-W	0.000	0.260	MWU	10042.0	0.243	N-V	-0.20	15.0 <sup>a</sup>
	K-S	0.000	0.260				V	11.8 <sup>b</sup>	
<i>Qmag</i>	S-W	0.305	0.481	MWU	5187.0	0.077	N-V	-0.39	63.2 <sup>b</sup>
	K-S	0.000	0.481				V	92.1 <sup>a</sup>	
<i>Qrad</i>	S-W	0.003	0.027	MWU	27.0	0.313	N-V	-1.00	1.9 <sup>b</sup>
	S-W	0.054	0.027				V	5.2 <sup>a</sup>	
<i>Qres</i>	S-W	0.012	0.001	MWU	4281	0.056	N-V	-0.47	62.7 <sup>b</sup>
	K-S	0.000	0.001				V	71.3 <sup>a</sup>	
<i>Qrug</i>	K-S	0.000	0.003	MWU	43450.0	0.000	N-V	-0.46	15.4 <sup>a</sup>
	K-S	0.000	0.003				V	9.7 <sup>b</sup>	

S-W: Shapiro-Wilk, K-S: Kolmogorov-Smirnov, Prueba<sub>n</sub>: Prueba de normalidad, Valor p<sub>n</sub>: Valor de la prueba de normalidad, BP: Breusch-Pagan, MWU: Prueba de Mann-Whitney U test no paramétrica, t|w: valor de prueba de t de Student y de Mann-Whitney U, Valor de p: Valor de la prueba, N-V: No vulnerables, V: Vulnerables, Efecto: Tamaño del efecto de Cohen, Superíndice (“a” y “b”): Grupos con diferente letra indican que son estadísticamente diferentes, *Pdou*: *Pinus douglasiana*, *Plei*: *Pinus leiophylla*, *Ppat*: *Pinus patula*, *Ppse*: *Pinus pseudostrobus*, *Qcra*: *Quercus crassifolia*, *Qmag*: *Quercus magnoliifolia*, *Qrad*: *Quercus radiata*, *Qres*: *Quercus resinosa* y *Qrug*: *Quercus rugosa*.

Cuadro 7. Resumen de las estadísticas descriptivas de la variable más importante para nueve especies de bosque templado en México.

Especie	Grupo	Variable	n	min	max	mediana	riq	media	DS	ES	IC
<i>Pdev</i>	N-V	bio8	96	13.4	24.4	18.4	4.4	18.9	2.8	0.3	0.6
<i>Pdou</i>	N-V	bio4	15	326.7	591.2	468.9	201.9	453.3	104.1	26.9	57.7
	V	bio4	74	96.2	321.8	234.6	62.2	228.8	56.0	6.5	13.0
<i>Plei</i>	N-V	bio4	562	300.1	640.0	464.2	169.7	453.0	92.4	3.9	7.7
	V	bio4	89	89.0	298.1	225.3	75.2	227.3	48.1	5.1	10.1
<i>Pooc</i>	N-V	bio7	419	15.0	34.6	19.7	5.6	20.7	3.7	0.2	0.4
<i>Ppat</i>	N-V	bio7	48	16.7	24.9	19.0	2.1	19.2	1.6	0.2	0.5
	V	bio7	18	13.0	15.7	14.8	1.0	14.7	0.7	0.2	0.4
<i>Ppse</i>	N-V	bio10	18	21.3	24.6	23.1	1.8	23.1	1.1	0.3	0.5
	V	bio10	139	11.6	21.1	17.0	3.2	16.8	2.3	0.2	0.4
<i>Qcra</i>	N-V	bio4	46	11.1	25.5	17.8	3.6	17.8	3.4	0.5	1.0
	V	bio4	395	12.3	26.8	16.6	3.7	17.3	2.8	0.1	0.3
<i>Qlau</i>	N-V	bio15	169	55.9	121.7	94.0	19.1	92.7	13.9	1.1	2.1
<i>Qmag</i>	N-V	bio18	21	825.0	1156.0	865.0	43.0	884.0	74.3	16.2	33.8
	V	bio18	402	75.0	806.0	353.5	215.0	374.4	151.1	7.5	14.8
<i>Qrad</i>	N-V	bio8	16	15.0	21.6	16.3	2.2	17.0	1.9	0.5	1.0
	V	bio8	5	13.9	14.6	14.5	0.5	14.3	0.3	0.1	0.4
<i>Qres</i>	N-V	bio4	33	115.4	179.4	141.1	35.2	147.0	20.0	3.5	7.1
	V	bio4	215	181.3	405.9	254.9	48.6	256.2	41.2	2.8	5.5
<i>Qrug</i>	N-V	bio7	143	13.6	20.7	18.2	2.8	18.0	1.8	0.2	0.3
	V	bio7	466	20.8	34.7	27.4	7.0	27.2	3.7	0.2	0.3

n: Número de sitios, riq: Rango intercuartílico, DS: Desviación estándar, ES: Error Estándar, IC: Intervalo de confianza. *Pdev*: *Pinus devoniana*, *Pdou*: *Pinus douglasiana*, *Plei*: *Pinus leiophylla*, *Pooc*: *Pinus oocarpa*, *Ppat*: *Pinus patula*, *Ppse*: *Pinus pseudostrobus*, *Qcra*: *Quercus crassifolia*, *Qlau*: *Quercus laurina*, *Qmag*: *Quercus magnoliifolia*, *Qrad*: *Quercus radiata*, *Qres*: *Quercus resinosa*, *Qrug*: *Quercus rugosa*, N-V: No vulnerables, V: Vulnerables, bio8: Temperatura media del trimestre más húmedo (°C), bio4: Estacionalidad de la temperatura (%), bio7: Rango anual de temperatura (°C), bio10: Temperatura media del trimestre más cálido (°C), bio15: Estacionalidad de la precipitación (%) y bio18: Precipitación del trimestre más cálido (mm).

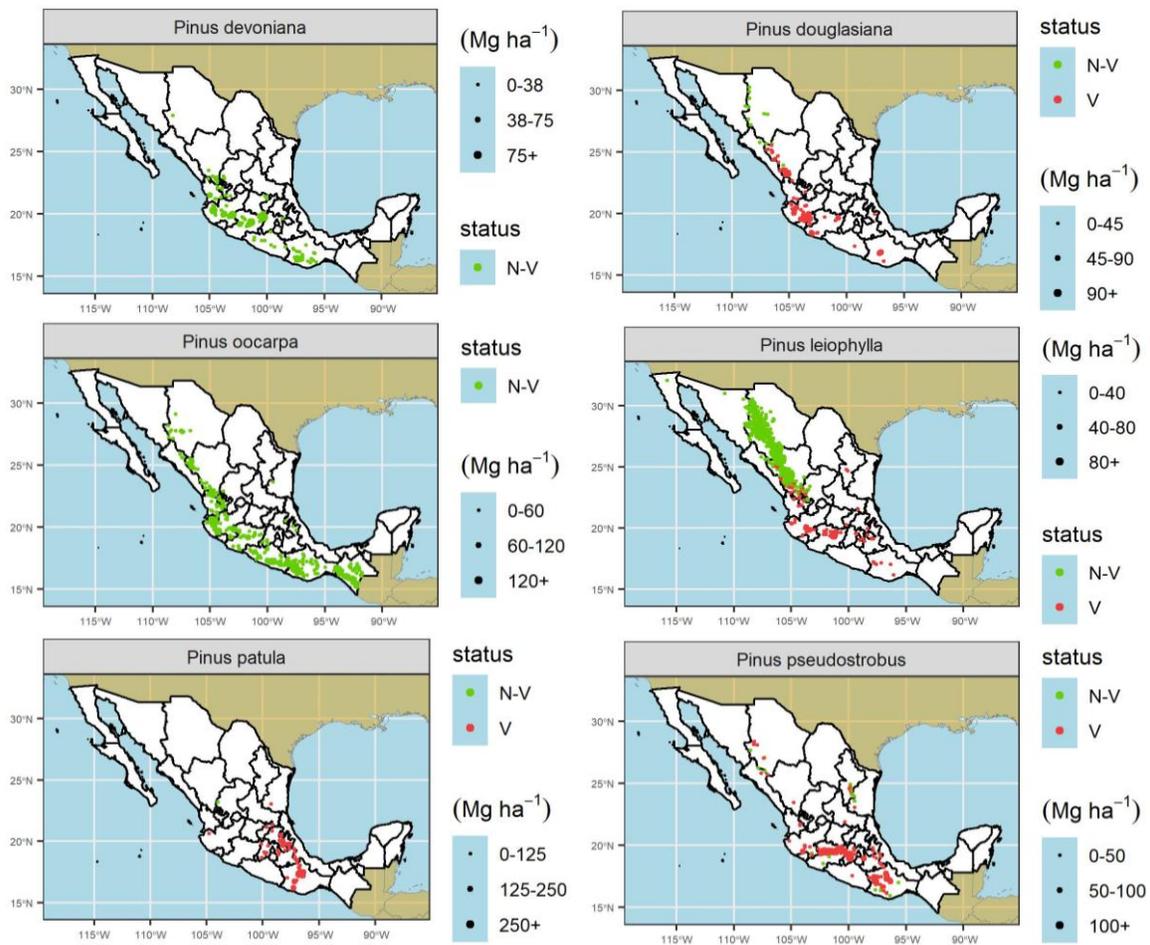


Figura 4. Distribución espacial de la densidad de carbono y estatus de vulnerabilidad para el género *Pinus* basado en los sitios del Inventario Nacional de Bosques y Suelos (2015-2020). El tamaño de los círculos indica la densidad de carbono y el gradiente de color de acuerdo a su vulnerabilidad, N-V: No vulnerables; V: Vulnerables.

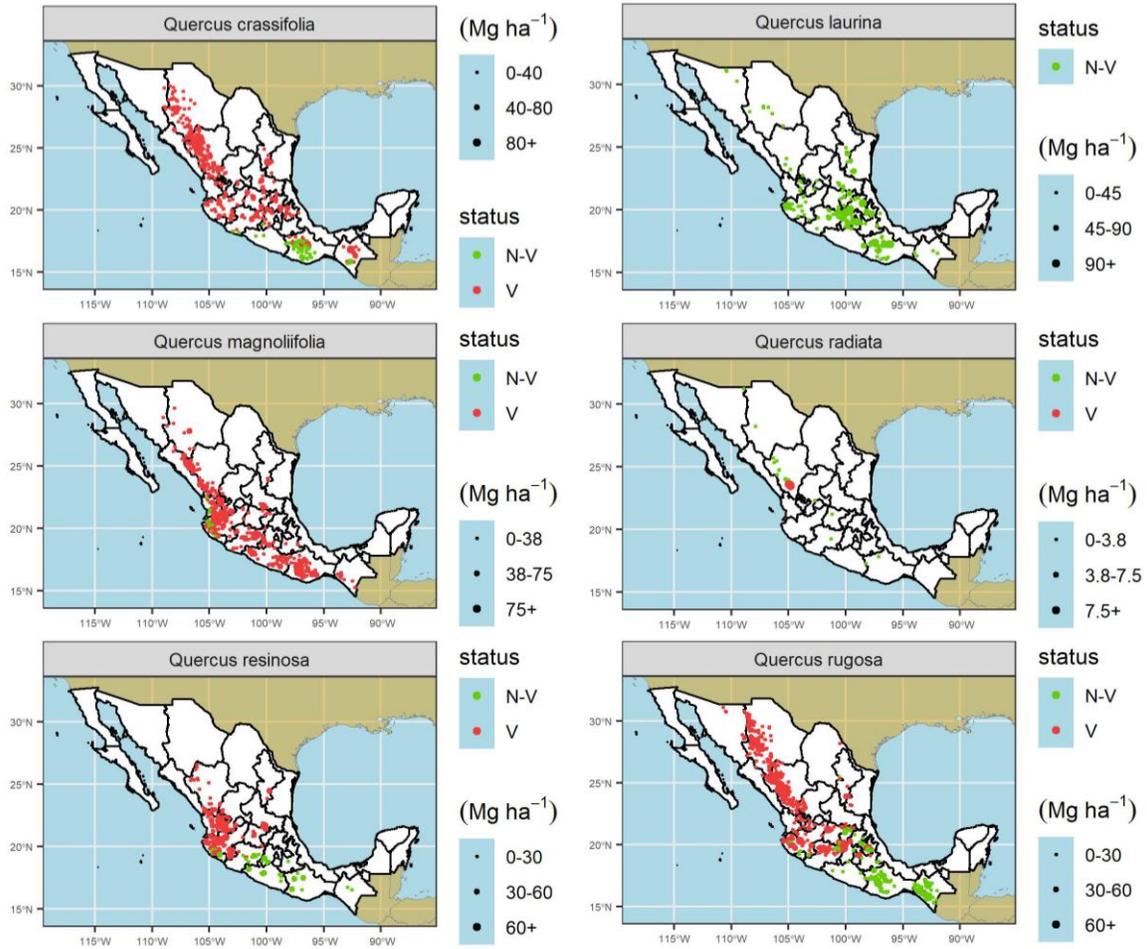


Figura 5. Distribución espacial de la densidad de carbono y estatus de vulnerabilidad para el género *Quercus* basado en los sitios del Inventario Nacional de Bosques y Suelos (2015-2020). El tamaño de los círculos indica la densidad de carbono y el gradiente de color el estatus de acuerdo a su vulnerabilidad, N-V: No vulnerables; V: Vulnerables.

## 5. CONCLUSIONES

La correlación bayesiana entre  $_{cd}AGB$  y las variables bioclimáticas indicaron que *Q. magnoliifolia*, *P. pseudostrobus*, *Q. rugosa* y *P. oocarpa* tienen una fuerte asociación con todas las bios, lo cual puede interpretarse como un signo de alta vulnerabilidad climática de estas especies. En contraste, *P. patula*, *P. devoniana* y *Q. radiata* mostraron correlaciones más débiles, lo que sugiere una mayor estabilidad frente al cambio climático. La relación entre  $_{cd}AGB$  de las especies y el clima no es lineal; por lo tanto, con modelos segmentados o no lineales se pueden mejorar las predicciones de  $_{cd}AGB$ . La  $_{cd}AGB$  de las especies que mostraron vulnerabilidad ante condiciones climáticas extremas corresponde a *P. pseudostrobus*, *Q. resinosa*, *P. leiophylla*, *P. douglasiana* y *Q. magnoliifolia*. Las especies de *Quercus* mostraron umbrales en percentiles más altos ( $38.15 \pm 10.08$ ) y mayor porcentaje de sitios clasificados como vulnerables ( $74.33 \pm 8.91$  %) que las de *Pinus* ( $30.58 \pm 7.41$ ;  $53.16 \pm 9.89$  %), por ende, mayor área de vulnerabilidad. Se observó que los sitios con vulnerabilidad se encuentran distribuidos en áreas de mayor altitud, longitud, y latitud, y, al mismo tiempo, son los que presentan mayores valores de  $_{cd}AGB$ . Se encontró que el género *Quercus* fue más vulnerable al umbral, percentil y porcentaje de sitios vulnerables con respecto a *Pinus*, siendo las especies que se correlacionaron con variables de temperatura las que indican mayor vulnerabilidad. Finalmente, si no existiera correlación entre la  $_{cd}AGB$  y las variables bioclimáticas no habría un umbral y por consiguiente ninguna especie mostraría vulnerabilidad al cambio climático.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Albritton, D. L., Barker, T., Bashmakov, I. A., Canziani, O., Christ, R., Cubasch, U., Davidson, O., Gitay, H., Griggs, D., Houghton, J., House, J., Kundzewicz, Z., Lal, M., Leary, N., Magadza, C., Mccarthy, J. J., Mitchell, J. F. B., Moreira, J. R., Munasinghe, M., ... Watson, R. T. (2001). *Core Writing Team Climate Change 2001: Synthesis Report The World Bank and the Core Writing Team*.
- Alfaro, R. F. U., Ramírez, A. J. E., Vargas, H. J. J., Franco, M. S., & Pérez, S. M. (2020). Potential reduction of Hartweg's Pine (*Pinus hartwegii* Lindl.) geographic distribution. *PLoS ONE*, *15*(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229178>
- Ali, A., Sanaei, A., Li, M., Nalivan, O. A., Ahmadaali, K., Pour, M. J., Valipour, A., Karami, J., Aminpour, M., Kaboli, H., & Askari, Y. (2020). Impacts of climatic and edaphic factors on the diversity, structure and biomass of species-poor and structurally-complex forests. *Science of The Total Environment*, *706*, 135719. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.135719>
- Álvarez, D. E., Cayuela, L., González C. S., Aldana, A. M., Stevenson, P. R., Phillips, O., Cogollo, Á., Peñuela, M. C., Von Hildebrand, P., Jiménez, E., Melo, O., Londoño, V. A. C., Mendoza, I., Velásquez, O., Fernández, F., Serna, M., Velázquez, R. C., Benítez, D., & Rey, B. J. M. (2017). Forest biomass density across large climate gradients in northern South America is related to water availability but not with temperature. *PLoS ONE*, *12*(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171072>
- Ávila, O. & H. D. (2020). "Regresión lineal segmentada". *Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional*.
- Baldwin, R. M., Owzar, K., Zembutsu, H., Chhibber, A., Kubo, M., Jiang, C., Watson, D., Eclov, R. J., Mefford, J., McLeod, H. L., Friedman, P. N., Hudis, C. A., Winer, E. P., Jorgenson, E. M., Witte, J. S., Shulman, L. N., Nakamura, Y., Ratain, M. J., & Kroetz, D. L. (2012). A genome-wide association study identifies novel loci for paclitaxel-induced sensory peripheral neuropathy in CALGB 40101. *Clinical Cancer Research*, *18*(18), 5099–5109. <https://doi.org/10.1158/1078-0432.CCR-12-1590>
- Balima, L. H., Kouamé, F. N. G., Bayen, P., Ganamé, M., Nacoulma, B. M. I., Thiombiano, A., & Soro, D. (2021). Influence of climate and forest attributes on aboveground carbon storage in Burkina Faso, West Africa. *Environmental Challenges*, *4*, 100123. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2021.100123>

- Barradas, V. L., Tapia, V. L. M., & Cervantes P. J. (2011). *Consecuencias del cambio climático en la ecofisiología vegetal de un bosque templado en Veracruz. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(spe2), 183-19
- Bennett, A. C., Penman, T. D., Arndt, S. K., Roxburgh, S. H., & Bennett, L. T. (2020). Climate more important than soils for predicting forest biomass at the continental scale. *Ecography*, 43(11), 1692–1705. <https://doi.org/10.1111/ecog.05180>
- Bernal, Z. H., Hugo, S. C., Onaindia O. &, & Gonzales, V. T. A. (2011). *Bosques del mundo, cambio climático y Amazonía. Cátedra Unesco-EHU de Desarrollo Sostenible y Educación Ambiental y a la Keele University (Research Institute for Life Course Studies)*.
- Cartus, O., Kellndorfer, J., Walker, W., Franco, C., Bishop, J., Santos, L., & Fuentes, J. M. M. (2014). A national, detailed map of forest aboveground carbon stocks in Mexico. *Remote Sensing*, 6(6), 5559–5588. <https://doi.org/10.3390/rs6065559>
- Chapela, F. (2012). *Estado de los bosques de México. Consejo civil mexicano para la silvicultura sostenible en México AC*. 6–22. <https://www.researchgate.net/publication/272743967>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chen, X., Luo, M., & Larjavaara, M. (2023). Effects of climate and plant functional types on forest above-ground biomass accumulation. *Carbon Balance and Management*, 18(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/S13021-023-00225-1/TABLES/2>
- Conde, C. (2007). *México y el cambio climático global. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. [www.dgdc.unam.mx](http://www.dgdc.unam.mx)
- Cuervo-Robayo, A. P., Ureta, C., Gómez-Albores, M. A., Meneses-Mosquera, A. K., Téllez-Valdés, O., & Martínez-Meyer, E. (2020). One hundred years of climate change in Mexico. *PLoS ONE*, 15(7 July). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209808>
- Díaz, C. G. El cambio climático. (2012). *Ciencia y Sociedad*, 37(2), 227–240.
- FAO. (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010: Informe principal. Roma*.
- FAO. (2022). El estado de los bosques del mundo 2022. Vías forestales hacia la recuperación verde y la creación de economías inclusivas, resilientes y sostenibles. Roma, FAO. En *El estado de los bosques del mundo 2022*. <https://doi.org/10.4060/cb9360es>

- Foden, W. B., Butchart, S. H. M., Stuart, S. N., Vié, J. C., Akçakaya, H. R., Angulo, A., DeVantier, L. M., Gutsche, A., Turak, E., Cao, L., Donner, S. D., Katariya, V., Bernard, R., Holland, R. A., Hughes, A. F., O'Hanlon, S. E., Garnett, S. T., Şekercioğlu, Ç. H., & Mace, G. M. (2013). Identifying the world's most climate change vulnerable species: A systematic trait-based assessment of all birds, amphibians and corals. *PLoS ONE*, 8(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065427>
- Fox, J., Weisberg, S., Price, B., Adler, D., Bates, D., Baud-Bovy, G., Bolker, B., Ellison, S., Firth, D., Friendly, M., Gorjanc, G., Graves, S., Heiberger, R., Krivitsky, P., Laboissiere, R., Maechler, M., Monette, G., Murdoch, D., Nilsson, H., ... R-Core. (2019). *An R Companion to Applied Regression, Third edition*. Sage, Thousand Oaks CA. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.car>
- Galicia, L., Gamboa C. A. M., Cram, S., Chávez V. B., Peña R. V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana* 34(1), 1-29.
- García, G. S. A., Alanís, R. e., Aguirre, C. O. A., Treviño, G. E. J., Cuellar, R. L. G., & Collantes, C. C. A. (2024). Effect of altitudinal gradient and climate variables on carbon storage in a temperate forest of Chihuahua, Mexico. *Madera y Bosques*, 30(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3032574>
- Girón, G. D., Méndez, G. J., Osorno, S. T. G., Cerano, P. J., Soto, C. J. C., & Cambrón, S. V. H. (2024). Climate as a Driver of Aboveground Biomass Density Variation: A Study of Ten Pine Species in Mexico. *Forests*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/f15071160>
- Gómez, M. L., & Arriaga, L. (2007). Modelación del efecto del cambio climático en la distribución de especies de encino y pino en México. *Biología de la conservación*, 21(6), 1545–1555. <https://doi.org/10.1111/J.1523-1739.2007.00814.X>
- González, M., Jurado, E., González, S., Aguirre, Ó., Jiménez, J., & Navar, J. (2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia uanl*, 6(3), 377-386.
- Guitérrez, E., & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179–188. <https://doi.org/10.7550/rmb.37737>
- Guo, Y., Peng, C., Trancoso, R., Zhu, Q., & Zhou, X. (2019). Stand carbon density drivers and changes under future climate scenarios across global forests. *Forest Ecology and Management*, 449. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117463>
- Hammond, W. M., Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Adams, H. D., Klein, T., López, R., Sáenz, R. C., Hartmann, H., Breshears, D. D., & Allen, C. D. (2022). Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communications*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2>
- Han, S. H., Kim, D. H., Kim, G. N., Lee, J. C., & Yun, C. W. (2012). Changes on Initial Growth and Physiological Characteristics of *Larix kaempferi* and *Betula costata*

- Seedlings under Elevated Temperature. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 14(2), 63–70. <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2012.14.2.063>
- Harris, N. L., Gibbs, D. A., Baccini, A., Birdsey, R. A., de Bruin, S., Farina, M., Fatoyinbo, L., Hansen, M. C., Herold, M., Houghton, R. A., Potapov, P. V., Suarez, D. R., Roman-Cuesta, R. M., Saatchi, S. S., Slay, C. M., Turubanova, S. A., & Tyukavina, A. (2021). Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 11(3), 234–240. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>
- Hijmans, R. J. (2024). geodata: Download Geographic Data. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/https://CRAN.R-project.org/package=geodata>
- IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.* Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático.
- Keith, H., Mackey, B. G., & Lindenmayer, D. B. (2009). Re-evaluation of forest biomass carbon stocks and lessons from the world's most carbon-dense forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(28), 11635–11640. [https://doi.org/10.1073/PNAS.0901970106/SUPPL\\_FILE/0901970106SI.PDF](https://doi.org/10.1073/PNAS.0901970106/SUPPL_FILE/0901970106SI.PDF)
- Kuhn, M., Wing, J., Weston, S., Williams, A., Keefer, C., Engelhardt, A., Cooper, T., Mayer, M., Kenkel, B., Core Team, R., Benesty, M., Lescarbeau, R., Ziem, A., Scrucca, L., Tang, Y., Can Candan, C., & Hunt, T. (2008). “Building Predictive Models in R Using the caret Package.” *Journal of Statistical Software*, 28(5), 1–26. <https://doi.org/doi:10.18637/jss.v028.i05>
- Larjavaara, M., Lu, X., Chen, X., & Vastaranta, M. (2021). Impact of rising temperatures on the biomass of humid old-growth forests of the world. *Carbon Balance and Management*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00194-3>
- Lie, Z., Xue, L., & Jacobs, D. F. (2018). Allocation of forest biomass across broad precipitation gradients in China's forests. *Scientific Reports 2018 8:1*, 8(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28899-5>
- Lin, D., Xia, J., & Wan, S. (2010). Climate warming and biomass accumulation of terrestrial plants: a meta-analysis. *New Phytologist*, 188(1), 187–198. <https://doi.org/10.1111/J.1469-8137.2010.03347.X>
- Liu, Y., Yu, G., Wang, Q., & Zhang, Y. (2014). How temperature, precipitation and stand age control the biomass carbon density of global mature forests. *Global Ecology and Biogeography*, 23(3), 323–333. <https://doi.org/10.1111/geb.12113>

- Ma, Y., Eziz, A., Halik, Ü., Abliz, A., & Kurban, A. (2023). Precipitation and temperature Influence the relationship between stand structural characteristics and aboveground biomass of forests—A Meta-Analysis. *Forests*, *14*(5). <https://doi.org/10.3390/f14050896>
- McKenney, D. W., Pedlar, J. H., Lawrence, K., Campbell, K., & Hutchinson, M. F. (2007). Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees. *BioScience*, *57*(11), 939–948. <https://doi.org/10.1641/B571106>
- Muggeo, V. M. R. (2003). Estimating regression models with unknown break-points. *Statistics in Medicine*, *22*(19), 3055–3071. <https://doi.org/10.1002/sim.1545>
- Muggeo, V. M. R. (2008). Segmented: an R package to fit regression models with broken-line relationships. *R news*, *8*(1), 20–25.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L., & Jackson, R. B. (2013). The structure, distribution, and biomass of the world’s forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, *44*, 593–622. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135914>
- Pebesma, E. by. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*, *10*(1). <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- Penman, J., Carruthers, I., & López, C. (2018). *Capítulo 1: Panorama general. Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas para UTCUTS.*
- Percy, K. E. , Jandl, R. , Hall, J. P. , & , & Lavigne, M. (2003). *El papel de los bosques en ciclo, la captura y el almacenamiento de carbono.*
- Reich, P. B., Luo, Y., Bradford, J. B., Poorter, H., Perry, C. H., & Oleksyn, J. (2014). Temperature drives global patterns in forest biomass distribution in leaves, stems, and roots. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *111*(38), 13721–13726. [https://doi.org/10.1073/PNAS.1216053111/SUPPL\\_FILE/PNAS.1216053111.ST08.DOCX](https://doi.org/10.1073/PNAS.1216053111/SUPPL_FILE/PNAS.1216053111.ST08.DOCX)
- Morey, D. R., Rouder, N. J., Jamil, T., Urbanek, S., Forner, K., & Ly, A. (2025). Package “BayesFactor” Title Computation of Bayes Factors for Common Designs. *The R Journal*, 1–58. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.BayesFactor>
- Rodríguez, V. P., Saatchi, S., Tansey, K., & Balzter, H. (2016). Magnitude, spatial distribution and uncertainty of forest biomass stocks in Mexico. *Remote Sensing of Environment*, *183*, 265–281. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2016.06.004>
- Rosete, V. F. A., Luis Pérez, D. J., Villalobos, D. M., Navarro, S. E. N., Salinas, C. E., & Remond, N. R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques*, *20*(1), 21–35.
- Rzedowski, J. (1991). *Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. Acta botánica mexicana*, (14), 3-21. (1991).

- Rzedowski, J., & Huerta, L. (2006). *Vegetación de México. Ira. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.*
- Sánchez G. A. (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques, 14*(1), 107–120.
- Sandoval, G. C., Méndez, G. J., Andrés, F., Villavicencio, G. E. E., Paz, P. F., Flores, L. C., Cornejo, O. E. H., Zermeño, G. A., Sosa, D. L., García, G. M., & Villarreal, Q. J. Á. (2024). Mapping the Future: Climate-Induced Changes in Aboveground Live-Biomass Carbon Density Across Mexico's Coniferous Forests. *Forests, 15*(11).  
<https://doi.org/10.3390/f15112032>
- Stegen, J. C., Swenson, N. G., Enquist, B. J., White, E. P., Phillips, O. L., Jørgensen, P. M., Weiser, M. D., Monteagudo Mendoza, A., & Núñez Vargas, P. (2011). Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients. *Global Ecology and Biogeography, 20*(5), 744–754. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00645.x>
- Ullah, F., Gilani, H., Sanaei, A., Hussain, K., & Ali, A. (2021). Stand structure determines aboveground biomass across temperate forest types and species mixture along a local-scale elevational gradient. *Forest Ecology and Management, 486*.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118984>
- Varela, S., Terribile, L. C., de Oliveira, G., Diniz, F. J. A. F., González, H. J., & Lima, R. M. S. (2015). ecoClimate, a new open-access repository with variables for the past, present and future climatic scenarios. *Ecosistemas, 24*(3), 88–92.  
<https://doi.org/10.7818/ecos.2015.24-3.11>
- Vargas, P. (2009). *El cambio climático y sus efectos en el Perú. Lima: Banco Central de Reserva del Perú.*
- Vieilledent, G., Gardi, O., Grinand, C., Burren, C., Andriamanjato, M., Camara, C., Gardner, C. J., Glass, L., Rasolohery, A., Rakoto Ratsimba, H., Gond, V., & Rakotoarijaona, J. R. (2016). Bioclimatic envelope models predict a decrease in tropical forest carbon stocks with climate change in Madagascar. *Journal of Ecology, 104*(3), 703–715.  
<https://doi.org/10.1111/1365-2745.12548>
- Villers-Ruiz, L., & Trejo-Vázquez, I. (1997). Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. *Climate Research, 09*(1–2), 87–93.  
<https://doi.org/10.3354/CR009087>
- Villers-Ruiz, L., & Trejo-Vázquez, I. (2000). *El cambio climático y la vegetación en México. México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program, 57-66.*
- Wang, C. J., Zhang, Z. X., & Wan, J. Z. (2019). Vulnerability of global forest ecoregions to future climate change. *Global Ecology and Conservation, 20*.  
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00760>

- Wang, L. Q., & Ali, A. (2021). Climate regulates the functional traits – aboveground biomass relationships at a community-level in forests: A global meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 761, 143238. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.143238>
- Wang, L. Q., & Ali, A. (2022). Functional identity regulates aboveground biomass better than trait diversity along abiotic conditions in global forest metacommunities. *Ecography*, 2022(1). <https://doi.org/10.1111/ecog.05854>
- Watkins, Kevin. (2007). *Informe sobre desarrollo Humano 2007-2008: Lucha contra el cambio climático : Solidaridad frente a un mundo dividido*. Publicado por el programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).
- Wickham, H., Chang, W., Henry, L., Lin P. T., Takahashi, K., Wilke, C., Woo, K., Yutani, H., Dunnington, D., Brand, T., & PBC, P. (2025). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4. <https://ggplot2.tidyverse.org>,
- Zhang, X., Zhou, Y., Ji, Y., Yu, M., Li, X., Duan, J., Wang, Y., Gao, J., & Guo, X. (2023). Climate Factors Affect Above–Belowground Biomass Allocation in Broad-Leaved and Coniferous Forests by Regulating Soil Nutrients. *Plants*, 12(23), 3926. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12233926/S1>

## 7. ANEXOS

### Anexo 1. Variables Bioclimáticas

Variable	Descripción
Bio 1	Temperatura Media Anual (°C)
Bio 2	Intervalo medio diurno (°C)
Bio 3	Isotermalidad (Bio2 / Bio7) (*100)
Bio 4	Estacionalidad de la temperatura (Desviación estándar *100)
Bio 05	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)
Bio 06	Temperatura mínima del mes más frío (°C)
Bio 07	Rango anual de temperatura (Bio5 – Bio6 °C)
Bio 08	Temperatura media del trimestre más húmedo (°C)
Bio 09	Temperatura media del trimestre más seco (°C)
Bio 10	Temperatura media del trimestre más cálido (°C)
Bio 11	Temperatura promedio del trimestre más frío (°C)
Bio 12	Precipitación anual (mm)
Bio 13	Precipitación del mes más lluvioso (mm)
Bio 14	Precipitación del mes más cálido (mm)
Bio 15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación, %)
Bio 16	Precipitación del trimestre más lluvioso (mm)
Bio 17	Precipitación del trimestre más seco (mm)
Bio 18	Precipitación del trimestre más cálido (mm)
Bio 19	Precipitación del trimestre más frío (mm)