

<https://doi.org/10.5154/r.ctasci.2024.05.03>

Versión en español

Establecimiento y monitoreo de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. Ex Parl. como mitigación al cambio climático en Huehuetla, Hidalgo.

Mario Castelán Lorenzo*; María Sol Robledo y Monterrubio

Universidad Autónoma Chapingo, Centro de Investigación en Biología, Educación Ambiental y Agricultura Orgánica, Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Texcoco Edo. de México, C. P. 56230. México.

Historial del artículo:

Fecha de recibido: October 28, 2024

Fecha de aceptado: May 12, 2025

***Autor de correspondencia:**

mcastelanl@chapingo.mx

Resumen

El cambio climático, como fenómeno global, ha impactado al planeta de diversas formas, alterando los patrones de comportamiento de los meteoros, lo que ha llevado a buscar alternativas y estrategias de mitigación y adaptación, siendo las plantaciones forestales una opción ambiental por su potencial para capturar CO₂, por ello, es necesario identificar las especies forestales que ayuden a esta tarea. Como una herramienta para probar la adaptabilidad de especies a regiones determinadas con un clima particular, se emplea la homologación climática, en este caso, se realizó en *Pinus greggii* Engelm. Ex Parl. para adaptarlo a las condiciones de Huehuetla, Hidalgo, por ser subtropical, con un alto potencial para recuperar áreas degradadas y de rápido crecimiento. Se tomaron en cuenta los parámetros climáticos: temperaturas cardinales, rango de precipitación y altitud, así como variables dasométricas: altura y diámetro de base. Se obtuvo una adaptación del 50 % a las condiciones naturales, atribuido principalmente a la altitud, considerando una diferencia de 300 m con respecto al lugar de plantación y el límite inferior en el que se distribuye la especie. El crecimiento es aceptable puesto que, a los 24 meses de monitorear y evaluar la plantación, los árboles tuvieron una altura promedio de 94.6 cm en altura promedio, y 1.6 cm en diámetro de base, con ejemplares que registran un diámetro normal de 1.14 cm, lo cual ha permitido obtener un volumen de 147.5 cm³ en promedio por árbol, que expresado en C corresponde a 61.81 g almacenados.

► **Palabras clave:** Homologación climática, *Pinus greggii*, Engelm. Ex Parl., servicios ambientales.

Introducción

En México, las plantaciones forestales han aumentado en los últimos años por la oportunidad que representa el incrementar la producción maderable, definiéndolas como el establecimiento y manejo de especies en terrenos de uso preferentemente forestal, de ahí que, la superficie cubierta por plantaciones forestales comerciales (PFC) de diversas especies a nivel nacional, alcanzó una superficie de 373 127.17 ha, de las cuales, las especies maderables representan un 85.2 %, distribuidas básicamente en los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche (CONAFOR, 2024; Diario Oficial de la Federación, 2024). Aunado a ello, como una opción para mitigar los efectos del cambio climático, las plantaciones forestales juegan un papel relevante, en el Sur y Sureste del

país se han empleado especies de rápido crecimiento como melina (*Gmelina arborea* Roxb.), teca (*Tectona grandis* L. f.), eucalipto (*Eucalyptus* spp.), entre otras, para fines maderables (Martínez-Zurimendi, 2015); para el caso del centro de México, se ha empleado el género *Pinus*, siendo *Pinus greggii* Engelm. Ex Parl. una de las especies más utilizadas para la recuperación de suelos erosionados y por su potencial para capturar carbono, tolerancia a la sequía, fluctuaciones de temperatura y resistencia a ciertas plagas (López et al., 2017; Martínez-Sifuentes et al., 2020; Ortiz et al., 2021; Villegas-Jiménez et al., 2013). Carrillo-Castañeda et al. (2024) refieren que *P. greggii* junto con *P. pseudostrobus* y *P. devoniana* establecidos con fines de restauración de suelos severamente degradados en Michoacán, mostraron un alto potencial para secuestrar carbono.

Please cite this article as follows (APA 7): Castelán-Lorenzo, M., & Robledo y Monterrubio, M. S. (2025). Establecimiento y monitoreo de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. Ex Parl. como mitigación al cambio climático en Huehuetla, Hidalgo. *Current Topics in Agronomic Science*, 5, e2403, <https://doi.org/10.5154/r.ctasci.2024.05.03>

Por otra parte, el incremento de CO₂ en la atmósfera ha inducido eventos climáticos extremos (inundaciones, huracanes intensos y otros) causando pérdidas humanas y económicas en todo el planeta. Así, el protocolo de Kioto en 1997 obliga a los países desarrollados a reducir las emisiones de gases que producen efecto invernadero, pero también proporciona mecanismos flexibles tales como el Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL), a través de la captura de carbono y secuestro de CO₂ por la biomasa forestal (IPCC, 2014; Gómez-Guerrero, et al., 2021).

En el municipio de Huehuetla se han realizado algunos intentos por establecer pequeñas plantaciones en terrenos particulares, principalmente para mejorar la sombra de los cafetales y obtener leña. Arteaga & Castelán (2008) establecieron una plantación agroforestal con melina (*Gmelina arborea* Roxb.), teca (*Tectona grandis* L. f.) y cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius* Wight et Arn.) en combinación con café, encontrando que el cedro rosado y melina fueron las especies que mejor se adaptaron al lugar. Pero el rango altitudinal de Huehuetla va desde los 400 hasta los 1 300 msnm con presencia de tres tipos de clima distintos, lo cual ofrece la oportunidad de probar distintas especies con temperaturas cardinales diferentes. Medina-Pérez et al. (2023) señalan que la Sierra Otomí-Tepehua, de la que forma parte el municipio de Huehuetla junto con San Bartolo Tutotepec y Tenango de Doria es vulnerable a eventos hidrometeorológicos extremos, derivados de la deforestación y cambios de uso de suelo forestal a agrícola y pecuario, y refieren como principales riesgos los deslizamientos por las fuertes lluvias que ocurren en la región.

Por lo anterior, el enfoque actual de las plantaciones debiera ser estratégico para mitigar los efectos del cambio climático, como la captura de CO₂ que forma parte del esquema de pago por servicios ambientales (FAO, 2022; PNUD, 2023); con esto, se está actuando de manera local para mitigar los efectos globales. De ahí surge la necesidad de establecer plantaciones forestales y conservar los bosques naturales que, para el caso de Huehuetla, Hidalgo, *P. greggii* es una especie que pudiera responder favorablemente a las condiciones naturales del municipio por su característica de ser subtropical (Perry, 1991; Ramírez-Herrera et al., 2005; Martínez-Sifuentes et al., 2020). Por otro lado, Ortiz et al. (2021) recomiendan emplear procedencias de *P. greggii* del norte y centro por ser endémica de México, y se ha constituido de gran importancia por su plasticidad genética para crecer en suelos erosionados, por lo cual, tiene potencial para la protección y recuperación de cuencas y áreas degradadas; muestra rápido crecimiento en este tipo de terrenos.

Lo anterior implica el uso de metodologías que aborden el grado de adaptación de especies a un entorno distinto de su distribución natural, como la homologación climática, en ese sentido, dicha distribución está limitada por aspectos fisiológicos, ecológicos y biogeográficos

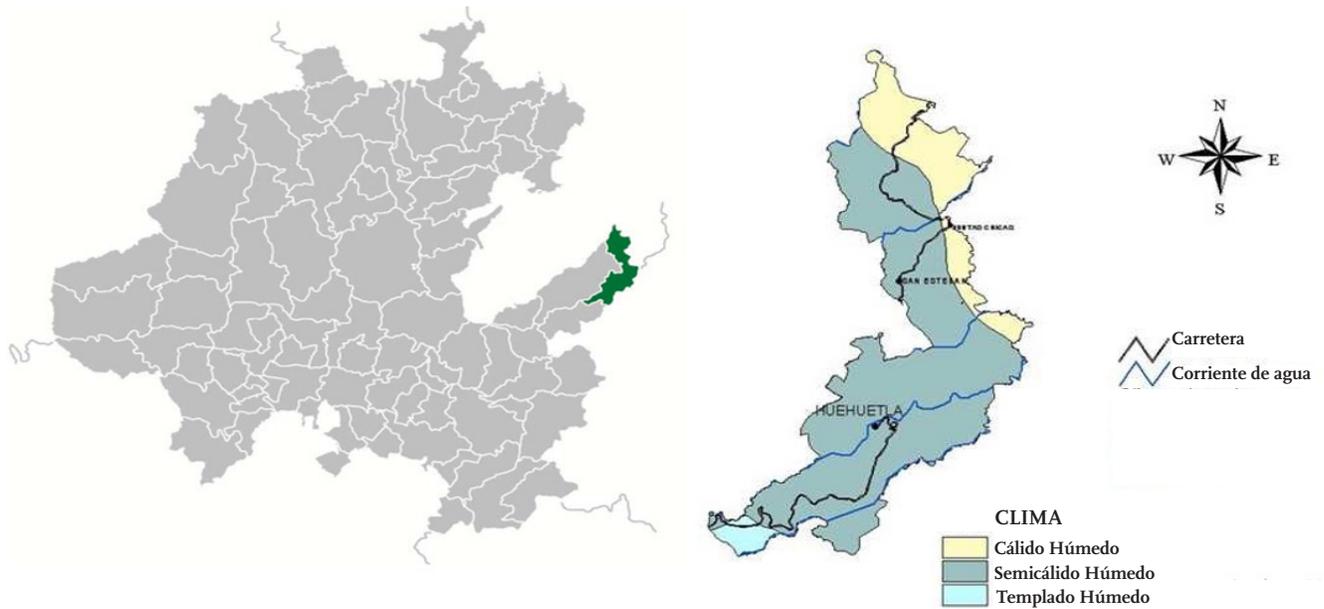
que hacen complicado calcular con exactitud el área de distribución de una especie, puesto que es un fenómeno dinámico (Maciel-Mata, 2015) y la homologación climática busca ampliar el rango de adaptación de especies de un lugar de origen distinto al que se pretende establecer, tomado en cuenta parámetros climáticos, siendo las temperaturas extremas, mínima absoluta y la distribución estacional y volumen anual de la precipitación los más relevantes (Golfari, 1963). Gómez (2021) aborda el concepto de homologación ecológica, siendo más complejo puesto que contempla la caracterización litológica, fisiográfica, climática y edáfica que influyen en el grado de adaptación. Por ello, en vista de que *P. greggii*, se distribuye en la cadena montañosa de la Sierra Madre Oriental, donde se ubica el municipio de Huehuetla, Hidalgo, el hacer uso de la homologación climática permitirá extender el rango local de distribución de esta especie de conífera subtropical.

Así, el objetivo de este trabajo fue establecer y monitorear una plantación experimental de *Pinus greggii* Engelm. Ex Parl. en el municipio de Huehuetla, Hgo., para evaluar el crecimiento inicial, potencial de adaptación y captura de carbono.

Materiales y Métodos

Descripción del área de estudio

El municipio de Huehuetla se localiza entre los paralelos 20° 23' a 20° 41' de latitud Norte y 97° 59' a 98° 10' de longitud Oeste, ubicándose hacia la parte Noroeste y Este del estado de Hidalgo. Forma parte de la región Tuxpan-Nautla; en la zona cafetalera denominada Otomí-Tepehua. De acuerdo con García (2004), Huehuetla tiene tres tipos de clima: clima cálido húmedo (Am) con lluvias en verano; tiene una estación corta, seca, en la mitad fría del año, pero con una cantidad total de lluvia suficiente para mantener el terreno húmedo durante todo el año, es intermedio entre el Af y el Aw, pareciéndose al primero en cuanto a cantidad total de lluvia y al segundo en cuanto a su distribución anual. La temporada de mayor precipitación se encuentra en el verano y parte del otoño que son las épocas en que los ciclones tropicales que afectan a México son más frecuentes y hacen aumentar considerablemente la cantidad de lluvia en la zona con este tipo de clima. Semicálido húmedo (ACf) con lluvias todo el año y templado húmedo (Cm) con abundantes lluvias en verano. La temperatura media anual va de 16 ° a 22 °C con una precipitación media de 2 400 mm y una altitud de 400 a 1 300 msnm. De acuerdo con INEGI (2010), los suelos son de los tipos Umbrisol (56.95 %), Luvisol (36.2 %), Leptosol (4.32 %) y Phaeozem (2.33 %) con una vegetación de tipo bosque tropical subperennifolio y bosque mesófilo de montaña. La plantación se estableció en suelos umbrisoles que según la FAO (2025) son aquellos que tienen una capa oscura con materia orgánica, pero con pH ácido, por debajo de 5.5 y con baja fertilidad. La Figura 1 muestra el mapa de ubicación del municipio y la distribución de climas.



Fuente: Gobierno del Estado de Hidalgo (2010). Elaboración con base en información de INEGI.

Figura 1. Ubicación del municipio de Huehuetla, Hidalgo y clima.

Establecimiento de la plantación

Se plantaron 200 ejemplares de pino con una altura promedio de 85 cm y 8 mm de diámetro de base, después de haber permanecido en vivero por un periodo de dos años, el terreno se preparó de forma manual, usando el sistema denominado cepa común, en vista de que la pendiente del terreno no permitió la mecanización; se abrieron cepas de 40 x 40 x 40 cm creando condiciones favorables para el arraigo de la planta y aumentar las probabilidades de supervivencia. El espaciamiento entre plantas fue de 2.5 x 2.5 m bajo un diseño de marco real. La plantación se realizó en junio de 2022 en el clima semicálido húmedo. La procedencia de la planta fue del Estado de México.

Homologación climática

Como una herramienta para probar la adaptabilidad a regiones determinadas con un clima particular, se realizó la homologación climática, empleando la metodología de la FAO (1981), que considera las variables climáticas del lugar de procedencia de una especie con respecto al lugar de utilización. Inicialmente se obtuvo la tabla térmica de *P. greggii*, posteriormente se evaluaron las temperaturas del municipio de Huehuetla reportadas por el Servicio Meteorológico Nacional, una vez ajustadas por el Gradiente Térmico Regional del lugar de plantación. Se contemplaron los siguientes parámetros climáticos, temperatura mínima, óptima y máxima, rango de precipitación y altitud, tanto de la especie considerada como del lugar de plantación.

Los requerimientos climáticos empleados de *P. greggii* fueron: rango altitudinal de 1 400 a 2 600 msnm, temperaturas cardinales

vitales de 12 a 20 °C con una óptima de 16.8 a 17.5 °C y extremas o cardinales letales de 45 °C y -9 °C. Rango de precipitación de 640 a 1 370 mm, aunque puede extenderse desde 500 a 2 900 mm (Dvorak et al., 1996; Ramírez-Herrera et al., 2005; Muñoz et al., 2012; Rodríguez et al., 2013). Sin embargo, Martínez-Sifuentes et al. (2020) reportan una temperatura media anual de 25.4 °C en el área de distribución en la Sierra Madre Oriental.

Para el caso del municipio de Huehuetla, se consideró el rango térmico de 14.0 a 32.5 °C y una precipitación de 2 400 mm anuales. La altitud específica del sitio de plantación fue de 1 100 msnm.

Evaluación y monitoreo

Se realizaron cuatro evaluaciones de supervivencia y crecimiento posteriores a la fecha de plantación, una cada seis meses (diciembre 2022, junio 2023, diciembre 2023 y junio 2024) considerando como variables dasométricas la altura, diámetro basal y diámetro normal (DAP). En la cuarta evaluación hubo árboles que alcanzaron y superaron la altura de 1.30 m, a los cuales se obtuvo el volumen con la fórmula general:

$$V = \frac{\pi}{4} * d^2 * A * Cm$$

Donde:

V = volumen total del árbol en cm³

d = diámetro normal del árbol (cm)

A= altura total del árbol (cm)

Cm= coeficiente mórfico o coeficiente de forma. Este coeficiente se utiliza para eliminar la sobreestimación del volumen del árbol derivada de la cubicación de un cilindro. Se empleó el valor de 0.65 para coníferas.

Estimación inicial del contenido de carbono en la biomasa

La cantidad de biomasa del arbolado, expresado en contenido de carbono se acerca al 50 %, independientemente del tipo de ecosistema, especie o región (Díaz et al., 2007; Acosta et al., 2009; Ronquillo-Gorgúa, et al., 2022), al igual que el IPCC (2005) señala que el contenido de carbono en el árbol equivale al 50 % del volumen. Con ello, la cantidad de carbono para el arbolado joven se estima como:

Cantidad de biomasa x Contenido de carbono =
Cantidad de carbono.

En la estimación de carbono se siguen varios métodos de cálculo, todos ellos son aproximados, (Portillo et al., 2023) señalan que el error en la estimación de biomasa y por consiguiente en el carbono, independientemente del método, es del 53 al 80 %, por lo que en este trabajo se emplearon tres métodos, 1) el sugerido por la CONAFOR (Comisión Nacional Forestal), expresado en la siguiente fórmula:

$$C = V * FD * CC * EF$$

Donde:

C: cantidad de carbono almacenado por árbol

V: volumen en m³

FD: factor de densidad, en coníferas es de 0.48

CC: contenido de carbono por especie, para *P. greggii* es de 51 %

FE: factor de expansión de biomasa, cuyo valor es de 1.3

2) El método Acosta et al. (2009), expresado con la ecuación alométrica para la determinación de la biomasa obtenida para *Pinus patula* Engelm. Ex Parl. y otras especies de pinos dada por:

$$B = 0.0948 * DN^{2.4079}$$

Donde:

B: biomasa (kg)

DN: diámetro normal (cm)

Multiplicando la biomasa por 0.50, lo que significa que el 50 % de la biomasa del árbol es C.

3) El método del IPCC (2005) que sugiere multiplicar el volumen obtenido del árbol por la fracción de carbono equivalente a 0.5.

Resultados y Discusión

La tabla térmica obtenida de *P. greggii* se presenta en el Cuadro 1, lo que permitió obtener el porcentaje de adaptación a las condiciones de Huehuetla, específicamente en el sitio de plantación, una vez restada la temperatura obtenida (3.4 °C) por efecto del Gradiente Térmico Regional.

Se obtuvo una adaptación del 50 % a las condiciones naturales, lo cual se deba quizá al factor altitud como limitante natural, en vista de la diferencia existente de 300 metros con respecto al lugar de plantación y el límite inferior en el que se distribuye la especie, sin embargo, tal y como lo señala Gómez (2021), este factor está considerado dentro de la caracterización fisiográfica, pero puede estar influenciado igualmente por la litología y edafología. Romahn-Hernández et al. (2020) en un estudio sobre la distribución natural del oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham.) reportaron una elevada mortalidad de árboles maduros en la cota altitudinal más baja, al igual que presentaron el menor vigor tanto el arbolado maduro como el juvenil, concluyendo que la altitud es un factor clave en la supervivencia del oyamel y como un indicio de que el oyamel se está desplazando a mayores altitudes como respuesta al cambio climático.

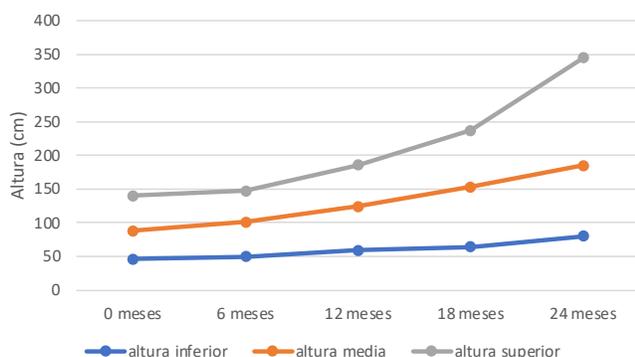
Con respecto a la temperatura, la zona evaluada se ubica dentro de los umbrales térmicos reportados por Ramírez-Herrera et al. (2005), cuyo rango óptimo es de 16 a 18 °C. En cuanto a precipitación, los 2 300 mm anuales de Huehuetla se ubican en dos de los rangos reportados para *P. greggii*, 500 mm a 2 900 mm y 750 mm a 2 300 mm. Con este porcentaje obtenido, se realizó la plantación los días 26 y 27 de junio de 2022, fecha en que el suelo estaba suficientemente húmedo, después del establecimiento de las lluvias y el día 28 de junio se realizó la primera medición de los ejemplares, esto es, la altura y diámetro de base inicial después de estar dos años en vivero.

El crecimiento de los individuos es aceptable puesto que, a los 24 meses de monitorear y evaluar la plantación, de los 104 ejemplares vivos, el 85 % de los árboles superaron 1.30 m de altura, el crecimiento medio es de 1.85 m y el máximo de 3.45 m (Figura 2), cuyo diámetro normal promedio es de 1.14 cm, lo cual, ha permitido obtener un volumen inicial de 147.5 cm³. Por su parte, el diámetro basal promedio supera los 20 mm y el superior alcanzó más de 50 mm (Figura 3). El Cuadro 2 muestra los estadísticos estimados, donde se nota el incremento en porcentaje en el crecimiento en altura y diámetro de base a dos años con respecto al tamaño inicial.

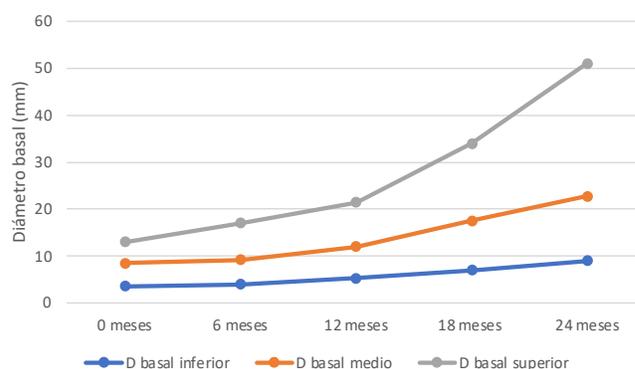
En cuanto a supervivencia, se observó una mortalidad gradual de los individuos, el orden de evaluación fue de 85.5,

Cuadro 1. Tabla térmica generada para *P. greggii* Engelm. ex Parl. con base en sus temperaturas cardinales.

Rangos de temperatura (°C)		Valor
Más de 25.2		0
23.5	25.1	1
21.8	23.4	2
20.1	21.7	3
18.4	20.0	4
16.7	17.5	5
15.0	16.6	4
13.3	14.9	3
11.6	13.2	2
9.9	11.5	1
Menos de 9.8		0

**Figura 2. Crecimiento en altura de *P. greggii* Engelm. ex Parl. en Huehuetla, Hidalgo.**

79.5, 67.5 y 51 % en la última evaluación. Entre los principales factores que influyeron en la mortalidad se identificó el daño por plagas, principalmente por el barrenador de tallos (*Oncideres* spp.), el cual provocó anillamiento en el tallo y limitó el flujo de savia en los individuos, lo cual fue observado solo en las primeras dos evaluaciones. Pero, además, la mortalidad se atribuye a la sequía excepcional extrema que se presentó en el año 2024, sobre todo, en los meses de marzo, abril y mayo, debido a sistemas anticiclónicos que provocaron olas de calor generando

**Figura 3. Crecimiento en diámetro basal de *P. greggii* Engelm. ex Parl. en Huehuetla, Hidalgo.**

un tiempo caluroso a muy caluroso y escasez de lluvia, afectando a 32 municipios del estado de Hidalgo y a casi todo el territorio nacional (CONAGUA-SMN, 2024). Sin embargo, el porcentaje es superior a la media nacional en reforestaciones (36 %) pero por debajo de lo que exige la Comisión Nacional Forestal (80 %) en el primer año (Vázquez-Cisneros et al., 2018).

Ortiz et al. (2021) ensayaron 13 procedencias del Norte y del Centro de México en suelos erosionados de la mixteca oaxaqueña, encontrando una alta adaptabilidad, por ello, se decidió emplear la procedencia del estado de México que, al igual que Flores et al. (2014) recomiendan el empleo de cualquier procedencia debido a su buen desarrollo, en vista de ser nativa de la Sierra Madre Oriental, entre ellos, el estado de Hidalgo (Domínguez-Calleros et al., 2017), al igual Hernández-Martínez et al. (2007) señalan que *P. greggii* Engelm. var. *australis* se distribuye de manera natural en el municipio de Tenango de Doria, Hidalgo, municipio colindante de Huehuetla, con lo que se estaría ampliando el rango de adaptación.

El *P. greggii* se ha empleado por su rápido crecimiento y potencial, en programas de recuperación de suelos degradados y capacidad de captura de carbono. López et al. (2017) estimaron la cantidad de carbono almacenado en suelos asociados a *P. greggii* y *P. oaxacana*, encontrando una alta cantidad de éste, tanto en el suelo, como en la

Cuadro 2. Estadísticos estimados para las variables altura y diámetro basal.

Parámetro	Variables					
	Altura inicial (cm)	Diámetro basal inicial (mm)	Altura a 24 meses (cm)	Diámetro basal a 24 meses (mm)	Incremento en altura (%)	Incremento en diámetro basal (%)
Valor inferior	46	3.6	80	9	53.96	85.71
Valor medio	90.1	6.9	184.7	22.7	68.85	106.75
Valor superior	140	11.3	345	51	84.53	127.45
Rango	94	7.7	265	42	95.26	138.03
Desviación estándar	19.689	1.612	52.134	8.046		

hojarasca, recomendando su empleo en suelos en condiciones de extrema erosión. Por su parte, Muñoz et al. (2012) evaluaron la sobrevivencia y crecimiento de *P. greggii* en la etapa de crecimiento inicial, encontrando que a los seis años superaron los cinco metros de altura con una sobrevivencia del 60 %.

En este sentido, el volumen inicial maderable de los pinos fue de $1.475 \times 10^4 \cdot \text{m}^3$ obtenido en 24 meses de monitoreo, expresado en carbono que corresponde a 46.94 g obtenidos por el método de CONAFOR, a su vez empleando el método de Acosta et al. (2009) se obtuvo una cantidad de 64.98 g y por el método del IPCC (2005) se obtuvieron 73.5 g, con lo cual se sacó un promedio de 61.81 g almacenados en la biomasa aérea de cada árbol, lo que representa una cantidad de 226.84 g de CO_2 removido de la atmósfera que considera la relación entre el peso total de la molécula de CO_2 (44) y el átomo de carbono (12) (Jiménez et al., 2013; Robledo, 2015; Jáuregui et al., 2022). Por otro lado, Pacheco et al. (2007) resaltan la importancia de *P. greggii* para capturar carbono, cuyo potencial de almacenamiento durante los seis primeros años es de $17.9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, que corresponde a una acumulación de dióxido de carbono equivalente a $65 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, considerando a esta especie como de un potencial alto para capturar carbono. Las diferencias en la cantidad de carbono almacenado obtenidas se deben a que los métodos empleados son indirectos, por tanto, calculan la biomasa del árbol con ecuaciones alométricas o modelos matemáticos calculados por medio de análisis de regresión entre variables de los árboles, tales como el diámetro normal (medido a 1.30 m de altura), la altura comercial (hc) y total (ht), el crecimiento diamétrico, el área basal y la densidad específica de la madera, pero igual, a partir del volumen del fuste, peso seco y un factor de expansión para calcular el peso total del árbol y la técnica del árbol promedio, que indica que el árbol de tamaño promedio tiene una cantidad promedio de biomasa. (Fonseca et al., 2013; Fonseca-González, 2017).

Pero igualmente, se han empleado especies tropicales cuya función ambiental es relevante, puesto que los bosques tropicales capturan más de $40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de CO_2 por año, equivalentes a un rango de entre 2.3 y 10 t de carbono (Robledo, 2015). Aguirre et al. (2018) estimaron en un bosque andino de Ecuador, que una hectárea de bosque captura $42.29 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de carbono acumulado en los estratos arbóreo, arbustivo, herbáceo y necromasa; si se considera solo el estrato arbóreo serían 26.56 t. A su vez, Seppänen (2002) indica que en el sureste de México las plantaciones de eucaliptos de alta productividad ($40 \text{ m}^3 \cdot \text{ha} \cdot \text{año}$) genera una captura neta de CO_2 entre 320 y $610 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, en un periodo de siete años, que equivale a un valor entre 91 y $175 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de carbono. Ya desde el 2007, la Red Iberoamericana de Física y Química Ambiental, publicó varios trabajos que versan sobre la temática de Captura de Carbono en ecosistemas terrestres iberoamericanos y se vislumbraba la necesidad de valorar este servicio ambiental en términos económicos (Gallardo, 2007).

El fundamento es que los ecosistemas forestales pueden capturar cantidades significativas de Gases de Efecto Invernadero (GEI), principalmente el CO_2 . Por tal motivo, en las últimas décadas existe un interés considerable por incrementar el contenido de carbono en la vegetación, mediante la conservación forestal y reforestación, entre otros. Gran número de estudios han demostrado la capacidad de las especies forestales para almacenar carbono en su biomasa (Rodríguez et al., 2016; Ronquillo-Gorgúa, et al., 2022). Derivando con ello, el pago del servicio ambiental por captura de carbono, conservando los bosques y a su vez, recuperar suelos desprovistos de vegetación y restauración de los ecosistemas con algún grado de deterioro.

Conclusiones

A 24 meses de establecida la plantación, el incremento en altura ha sido mayor de 90 cm, mientras que en diámetro basal ha incrementado más de 1.5 cm y un diámetro normal mayor a 1 cm, a los 12 meses, el 28 % de los árboles rebasaron la altura requerida para medir el diámetro normal (1.30 m) hasta llegar al 85 % en la última medición, lo que ha permitido obtener un volumen inicial que cuantificado en carbono almacenado por árbol es superior a los 60 g.

La contribución para mitigar los efectos del cambio climático puede ser considerable puesto que las reforestaciones y plantaciones forestales son una prioridad como estrategia para capturar el exceso de dióxido de carbono vertido a la atmósfera y al mismo tiempo conservar los bosques nativos.

La homologación climática local permitirá ampliar el rango de distribución de *P. greggii*, puesto que las temperaturas de la región se encuentran en el rango térmico de la especie y se espera sea clave como especie usada para reforestar terrenos improductivos o degradados y que requieren una reconversión a la vocación forestal.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo el apoyo económico recibido para financiar el presente estudio a través del proyecto 24080-C-94. Se extiende un sincero agradecimiento al Sr. Isidro Jiménez Tolentino por el apoyo en la preparación del terreno y por su interés en el cuidado, protección y seguimiento de la plantación. Así como a los revisores anónimos que contribuyeron valiosamente en la mejora de la redacción.

Referencias

- Acosta, M. M., Carrillo, A. F., & Díaz, L. M. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105-114.

- Aguirre, M. Z., Quizhpe, C. W., & Pinza, D. (2018). Estimación del carbono acumulado en una parcela permanente de bosque andino en el parque universitario Francisco Vivar Castro, Loja, Ecuador. *Arnaldoa*, 25(3), 939-952. <http://dx.doi.org/10.22497/arnaldoa.253.25307>
- Arteaga M. B., & Castelán L. M. (2008). Evaluación dasométrica temprana de una plantación agroforestal de tres especies, introducidas en el municipio de Huehuetla, Hidalgo. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 14 (2), 106-111. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rscfa/v14n2/v14n2a5.pdf>
- Carrillo-Castañeda, M., Jiménez-Belmán, A. A., Gómez-Romero, M., García-Oliva, F., & Lindig-Cisneros, R. (2024). Potential for carbon sequestration in severely degraded temperate climate sites: Acrisol and Andosol gullies in Mexico. *Forest Systems*, 33(2), eSC04. <https://doi.org/10.5424/fs/2024332-20888>
- CONAFOR, (2024). Programa Nacional Forestal 2020-2024. Disponible en: https://www.conafor.gob.mx/transparencia/docs/2024/Avances_y_resultados_PNF_enero_2023_a_junio_2024.pdf. Consultada el 20 de marzo de 2025.
- CONAGUA-SMN. (2024). Monitor de sequía en México. Comisión Nacional del Agua. Servicio Meteorológico Nacional. Disponible en: <https://n9.cl/ulbboh>. Consultada el 15 de octubre de 2024.
- Díaz, F. R., Acosta, M. M., Carrillo, A. F., Buendía, R. E., Flores, A. E., & Etchevers B. J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25-34. <https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311233>
- Domínguez-Calleros, P. A., Díaz-Vásquez, M. A., Rodríguez-Laguna, R., Capulín-Grande, J., & Razo-Zárate, R. (2017). Influencia de factores edáficos en el crecimiento de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. en Santiago de Anaya, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 23 (2), 145-154. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321522>
- Dvorak, W. S., Kietzka, J. E., & Donahue, J. K. (1996). Three-year survival and growth of provenances of *Pinus greggii* Engelm. in the tropics and subtropics. *Forest Ecology & Management* 83:123-131.
- FAO. (1981). The Agroecological Zones Project. Methodology and Results for Central and South America. Food and Agriculture Organization. Rome, Italia.
- FAO. (2022). Soluciones forestales para combatir el cambio climático. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e9692408-d582-4be9-a081-9203402de647/content>. Consultada el 15 de marzo de 2025.
- FAO. (2025). Portal de suelos de la FAO. Disponible en: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistema-universal-de-clasificacion-de-suelos/es/>. Consultada el 30 de abril, 2025.
- Flores, F. C., López, U. J., & Valencia, M. S. (2014). Manual técnico para el establecimiento de ensayos de procedencias y progenies. Comisión Nacional Forestal. Zapan, Jalisco, México.
- Fonseca, G., Ruíz, L., Rojas, M., & Alice, F. (2013). Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. *Revista de Ciencias Ambientales*, 46(2), 37-50. <https://doi.org/10.15359/rca.46-2-4>
- Fonseca-González, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales. Tropical Journal of Environmental Sciences*, 51 (2), 91-109. <http://dx.doi.org/10.15359/rca.51-2.5>
- Gallardo, L. J. F. (2007). La captura de carbono en ecosistemas terrestres Iberoamericanos (Ed.). RED POCAIBA. Salamanca, España.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlas a las condiciones de la República Mexicana). Quinta Edición Digital. México. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- Golfari, L. (1963). Exigencias climáticas de las coníferas tropicales y subtropicales. *Unasylva*, 17(68). <https://n9.cl/6ub65>
- Gómez-Guerrero, A., Correa-Díaz, A., & Castruita-Esparza, L. U. (2021). Cambio climático y dinámica de los ecosistemas forestales. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44(4), 673-682. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.4.673>
- Gómez, S. V. (2021). La estación forestal y su homologación ecológica en los trabajos de repoblación forestal. En J. Pemán-García, R. M. Navarro-Cerrillo, M. A. Prada-Sáez & R. Serrada-Hierro (Coords.), Bases técnicas y ecológicas del proyecto de repoblación forestal. Tomo 1 (pp. 128-195). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. España. <https://n9.cl/l0qsn>
- Hernández-Martínez, J., López-Upton, J., Vargas-Hernández, J. J., & Jasso-Mata, J. (2007). Zonas semilleras de *Pinus greggii* var. *australis* en Hidalgo, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(3), 241-249. <https://doi.org/10.35196/rfm.2007.3.241>
- INEGI. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010, Huehuetla, Hidalgo. Disponible en: <https://n9.cl/rnao0>. Consultada el 10 de octubre de 2024.
- IPCC. (2005). La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático. Organización Meteorológica Mundial. PNUMA. Disponible en: https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_sp.pdf. Consultada el 15 de octubre de 2024.
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- Jáuregui, R. R. de J., Gallegos, R. A., Hernández, A. E., Guzmán, P. C., & Sube R. J. L. (2022). Estimación del carbono almacenado del arbolado urbano de Guadalajara, Jalisco, México, mediante modelos Biométricos. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 5(1), 224-240. Doi: 10.34188/bjaerv5n1-018

- Jiménez, P. J., Treviño, G. E. J., & Yerena, Y. J. I. (2013). Concentración de carbono en especies del bosque de pino-encino en la sierra madre oriental. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), 50-61. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i17.420>
- Diario Oficial de la Federación. (2024). Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Disponible en: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGDFS.pdf>. Consultada el 1 de marzo de 2025.
- López, O. M., Sánchez, G. R. B., Contreras, H. J. R., Armenta, B. A. D., & Félix, H. J. A. (2017). Captación de carbono en suelos asociados a *Pinus greggii* Engelm. y *Pinus oaxacana* Mirov. en la mixteca alta, Oaxaca. *Ecología Aplicada* 16(2), 127-133. <https://www.redalyc.org/journal/341/34153892007/html/>
- Maciel-Mata, C. A., Manríquez-Morán, N., Octavio-Aguilar, P., & Sánchez-Rojas, G. (2015). El área de distribución de las especies: revisión del concepto. *Acta universitaria*, 25(2), 03-19. <https://doi.org/10.15174/au.2015.690>
- Martínez-Zurimendi, P., Domínguez-Domínguez, M., Juárez-García, A., López-López, L. M., Cruz-Arias V., & Álvarez-Martínez, J. (2015). Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* en Tabasco. *Rev. Fitotecnia Mexicana*. 38 (4), 415 – 425. <https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/38-4/10a.pdf>
- Martínez-Sifuentes, A. R., Villanueva-Díaz, J., Manzanilla-Quiñones, U., Hernández-Herrera, J. A., Estrada-Ávalos, J., & Velázquez-Pérez, A. H. (2020). Spatial modeling of the ecological niche of *Pinus greggii* Engelm. (Pinaceae): a species conservation proposal in Mexico under climatic change scenarios. *Forest - Biogeosciences and Forestry*, 13(5), 426-434. doi: <https://doi.org/10.3832/for3491-013>
- Medina-Pérez, P. C., Tapia-Fernández, H. J., & Castillo-Martínez, A. (2023). Vulnerability and environmental risk in the Sierra Otomí tepihua (Hidalgo, Mexico): implications in the rural-indigenous scope. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 49(1). 139-161. <http://doi.org/10.18172/cig.5393>
- Muñoz, F. H. J., Coria, A. V. M., García, S. J. J., Velasco, B. E., & Martínez, M. G. (2012). Evaluación de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. con dos espaciamientos. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3 (11), 57-70. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v3n11/v3n11a5.pdf>
- Návar, J. J. (2009). Allometric equations and expansion factors for tropical dry trees of Eastern Sinaloa, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10 (1), 45-52. <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243004.pdf>
- Ortiz, M. R., Aguirre, C. O. A., Gómez, C. M., Treviño, G. E. J., & González, T. M. A. (2021). Crecimiento de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en suelos degradados de la Mixteca Alta, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(64), 4-22. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.710>
- Pacheco, E. F. C., Aldrete, A., Gómez, G. A., Fierros, G. A. M., Cetina, A. V. M., & Vaquera, H. H. (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(3), 251-254. <https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/30-3/5a.pdf>
- Perry, J. P. (1991). *The pines of Mexico and Central America*. Timber Press. Portland, OR, USA.
- PNUD. (2023). Cómo pueden ayudarnos los bosques a limitar los impactos del cambio climático. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Disponible en: <https://n9.cl/3c5bm>. Consultada el 20 de marzo de 2025.
- Portillo, Q. C., Hernández, S. J. L., & Dupuy, J. M. (2023). Aplicaciones geoespaciales para el monitoreo de selvas tropicales en el contexto del cambio climático. Ponencia presentada en el I Congreso Internacional de Cambio Climático. 23 al 25 de octubre de 2023. Mérida, Yucatán. México.
- Ramírez-Herrera, C., Vargas-Hernández, J. J., & López-Upton, J. (2005). Distribución y conservación de las poblaciones naturales de *Pinus greggii*. *Acta Botánica Mexicana*, (72), 1-16. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-71512005000300001&lng=es&tlng=es
- Robledo, A. C. (2015). Technical guide on the quantification of carbon benefits in in situ projects. Technical series 43. International Tropical Timber Organization. Yokohama, Japan. https://www.itto.int/direct/topics/topics_pdf_download/topics_id=4328&no=1&disp=inline
- Rodríguez, L. L. A., Guevara, H. F., Reyes, M. L., Ovando, C. J., Nahed, T. J., Prado, L. M., & Campos, S. R. A. (2016). Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7 (37), 77-94. <https://n9.cl/dzj8y>
- Rodríguez, L. R., Razo, Z. R., Valencia, M. S., & Meza, R. J. (2013). Características dasométricas de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *greggii* de nueve procedencias en Galena, Nuevo León. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 4(18), 116-124. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i18.394>
- Romahn-Hernández, L. F., Rodríguez-Trejo, D. A., Villanueva-Morales, A., Monterroso-Rivas, A. I., & Pérez-Hernández, M. de J. (2020). Rango altitudinal: factor de vigor forestal y determinante en la regeneración natural del oyamel. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, 8(22), 1-17. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2020.22.72751>
- Ronquillo-Gorgúa, N., Razo-Zárate, R., Rodríguez-Laguna, R., Acevedo-Sandoval, O. A., Hernández-Ortiz, J., & Manzur-Chávez, N. (2022). Almacenamiento de carbono en etapas de crecimiento de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. en la Sierra Alta Hidalguense. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 28(3), 483-497. <https://doi.org/10.5154/rchscfa.2022.02.009>
- Seppänen, P. (2002). Secuestro de carbono a través de plantaciones de eucalipto en el trópico húmedo. *Foresta Veracruzana*, 4(2), 51-58.

- Vázquez-Cisneros, I., Prieto-Ruíz, J. A., López-López, M. A., Wehenkel, C., Domínguez-Calleros, P. A., & Muñoz-Sáez, F. E. (2018). Crecimiento y supervivencia de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *greggii* bajo diferentes tratamientos de fertilización. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(2), 251-264. <https://doi.org/10.5154/r.rchs-cfa.2017.05.036>
- Villegas-Jiménez, D. A., Rodríguez-Ortiz, G., Velasco-Velasco, V. A., Ruiz-Luna, J., Carrillo-Rodríguez, J. C., & Ramírez-Sánchez, S. E. (2013). Partición de biomasa aérea en procedencias de *Pinus greggii* plantadas en el sur de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36 (4), 421-427. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v36n4/v36n4a8.pdf>