



**Universidad Michoacana de San
Nicolás de Hidalgo**

**Instituto de Investigaciones
sobre los Recursos Naturales**



Uso de plantas nodrizas para *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca y el Nevado de Toluca.

TESIS

como requisito para obtener

el título profesional de

**MAESTRA EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA
INTEGRATIVA**

Presenta

Bio. Legna Anaid Pérez Cruz

Directores de Tesis

Asesor: Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero

Co-asesor: Dr. Arnulfo Blanco García



Morelia Michoacán agosto de 2024.

**Tesis elaborada en el laboratorio de Genética Forestal
del Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales.**



Director de tesis: Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero¹

Co-Director: Dr. José Arnulfo Blanco García²

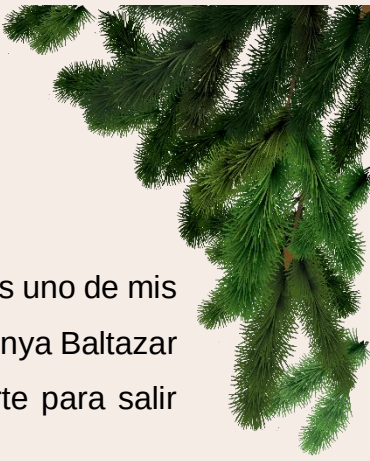
Comité:

Dr. Leonel López Toledo¹

Dra. Verónica Osuna Vallejo¹

Dra. Ana Gabriela Zacarías Correa¹

- 1 Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Av. San Juanito Itzícuaros/n, Col. Nueva Esperanza, Morelia, Michoacán, CP 58330, México.
- 2 Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Santiago Tapia 403, Col. Centro. Morelia, Michoacán CP 58000, México.



AGRADECIMIENTOS

A mi familia conformada por mi pareja Luis Eduardo Baltazar Cruz, que es uno de mis mayores apoyos en esta carrera desde que llegó a mi vida. Y a mi hija Annya Baltazar Pérez por llegar en este momento y convertirse en mi motor más fuerte para salir adelante. Gracias por brindarme amor en todas sus expresiones.

A mi familia: gracias a mis padres Diana Cruz Ramírez, Miguel Ángel Pérez González y mi hermano Diego Miguel Pérez Cruz, que me dan amor, alegrías, aprendizajes y apoyo incondicional para estudiar y formarme como persona y profesional.

Dr. Arnulfo Blanco García por ser parte importante de mi formación académica tanto en la licenciatura como en la maestría y ser la inspiración que me llevó a tomar la decisión de dedicarme a estudiar proyectos de restauración.

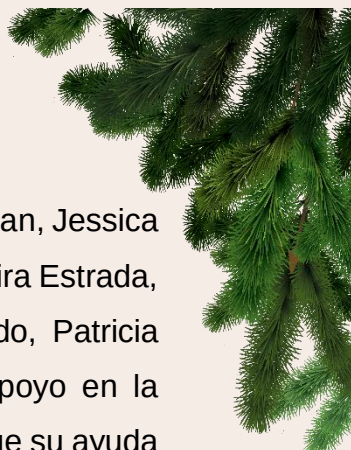
Dra. Verónica Osuna Vallejo por su entusiasmo, amistad y apoyo académico. Y enseñarme como las mujeres investigadoras son tan fuertes e importantes en el mundo de la ciencia.

Dra. Ana Gabriela Zacarías Correa, gracias por el apoyo moral y ayuda en dudas sobre redacción con los textos que se realizaron en el transcurso de mi maestría.

Dr. Cuauhtémoc Saénz Romero, siendo uno de los peldaños más importantes para obtener este grado, brindando apoyo incondicional y compromiso con los experimentos, la supervisión de los análisis estadísticos y documentos como material de publicación de los resultados obtenidos.

Dr. Leonel López Toledo por su apoyo en la realización de análisis estadísticos y en el trabajo de tesis de grado.





A mis compañeros, equipo de trabajo y amigos: Ma. Guadalupe Joaquín Juan, Jessica Simone Ambriz Guerrero, Martel Blanco de la Cruz, Yavé Aquino Melo, Saira Estrada, Verónica Osuna Vallejo, Ana Laura Cruzado Vargas, José Luis Gallardo, Patricia Herrejón, Jeorgi Eduardo Mansa y Adaneli Jiménez Villegas, por el apoyo en la producción y cuidado de plantas utilizadas en los experimentos. Al igual que su ayuda en el establecimiento y seguimiento de dichos proyectos.

A mis amigos y compañeros: Fabiola Itzel Loeza Torrero, Ana Fernanda Salinas García y Jonathan Josué Zamudio Flores, por brindarme su amistad durante este tiempo y apoyo moral.

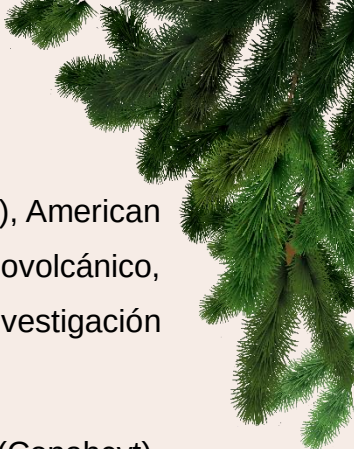
A mis amigas: Valeria González Mejía, Alison Maldonado y Stephani Michell Luna, son un pilar fundamental para empoderarnos y ayudarnos la una a la otra. Al igual gracias por ayudarme a despejar mi mente en los momentos necesarios con las clases compartidas, todo el aprendizaje y las reuniones, salidas a bailar, risas y amor.

Al comisariado ejidal, por la ayuda y la atención prestada durante toda la realización del experimento en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, en especial al Sr. Luis Martínez García y sus hijos: José Luis Martínez Hernández y Jhonathan Martínez Hernández.

Al director actual el Ing. Amado Fernández Islas y el director anterior, M. en C. Felipe Martínez Meza de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, por permitirnos llevar a cabo nuestro trabajo dentro de la reserva.

Bio. Eligio García Serrano, por el gran apoyo que nos brindó en tanto a los contactos con el Fondo de Conservación del Eje Neovolcánico A.C.





Al Financiamiento de: Monarch Butterfly Found (Madison, Wisconsin, USA), American Forests (Washington D.C., USA), el Fondo de Conservación del Eje Neovolcánico, A.C., la Comisión Forestal de América del Norte y la Coordinación de la Investigación Científica, UMSNH.

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), por brindarme el apoyo económico de una beca durante los dos años del estudio de mi maestría.

DEDICATORIA

Gracias por llegar a darle un nuevo sentido a mi vida, te amo hija mía:

Annya Baltazar Pérez.



CONTENIDO GENERAL

AGRADECIMIENTOS	3
DEDICATORIA	6
CONTENIDO GENERAL	7
ÍNDICE DE FIGURAS Y CUADROS	10
ÍNDICE DE FIGURAS CAP. I.	10
ÍNDICE DE CUADROS CAP. I.	10
ÍNDICE DE FIGURAS CAP. II.	11
ÍNDICE DE CUADROS CAP. I.	12
RESUMEN GENERAL.....	14
ABSTRACT.....	15
OBJETIVOS.....	16
Objetivo General.....	16
Objetivos particulares.....	16
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	17

a. CAPITULO I: Establecimiento de arbustos como plantas

nodrizas para incrementar el éxito de la restauración en bosques

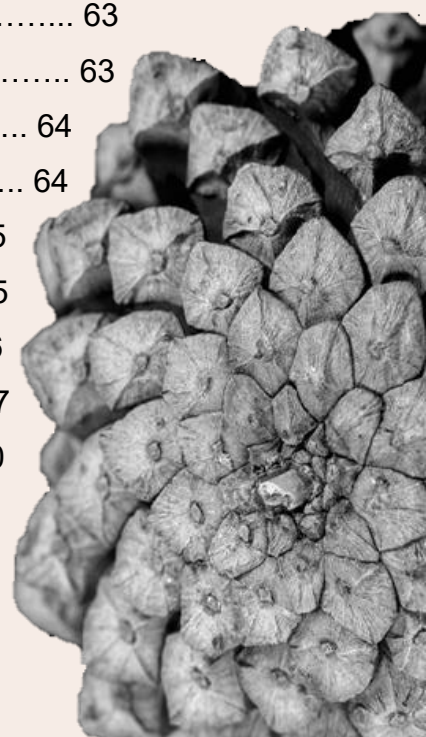
de *Abies religiosa*..... 22

1 RESUMEN.....	23
2 INTRODUCCIÓN.....	24
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
3.1 Área de estudio.....	26
3.2 Producción de planta en vivero.....	29
3.3 Diseño experimental.....	29
3.4 Variables evaluadas.....	29



	3.5 Análisis estadísticos.....	30
	3.6 Predicción de tiempo para alcanzar la talla deseada.....	31
	3.7 Precipitación y temperatura.....	31
4	RESULTADOS.....	32
	4.1 Incremento en altura de planta.....	32
	4.2 Identificación del tiempo para alcanzar la talla adecuada.....	32
	4.3 Precipitación media mensual en el paraje Monera Alta.....	33
5	DISCUSIÓN.....	33
6	CONCLUSIONES.....	35
7	AGRADECIMIENTOS.....	36
8	BIBLIOGRAFÍA.....	36
9	ANEXOS.....	48
	9.1 Cuadros.....	48
	9.2 Figuras.....	51

	b. CAPITULO II: Migración asistida de <i>A. religiosa</i> de diferentes procedencias altitudinales dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.....	58
1	RESUMEN.....	59
2	INTRODUCCIÓN.....	60
3	HIPÓTESIS.....	63
4	OBJETIVOS.....	63
	4.1 Objetivo general.....	63
	4.2 Objetivos específicos.....	63
5	MATERIALES Y MÉTODOS.....	64
	5.1 Área de estudio.....	64
	5.2 Recolección de semillas y producción de planta.....	65
	5.3 Diseño experimental.....	65
	5.4 Acomodo de bloques y parcelas.....	66
	5.5 Establecimiento en campo.....	67
	5.6 Variables evaluadas.....	70
	5.7 Datos climáticos.....	71



5.8	Análisis estadísticos.....	72
6	RESULTADOS.....	73
6.1	Supervivencia.....	73
6.2	Incremento en altura de planta.....	76
6.3	Índice de Estrés.....	78
6.4	Diámetro Basal.....	79
6.5	Precipitación y Temperatura.....	81
7	DISCUSIÓN.....	85
8	CONCLUSIONES.....	86
9	BIBLIOGRAFÍA.....	87
10	CONCLUSIÓN GENERAL.....	90
11	BIBLIOGRAFÍA GENERAL.....	91



ÍNDICE DE FIGURAS Y CUADROS

ÍNDICE DE FIGURAS CAP. I.

Figura 1. Localización del paraje Monera Alta dentro de la RBMM, en el Ejido de Cerro Prieto, Angangueo Michoacán, México (Mapa realizado por Manzanilla-Quijada G. E. y Baltazar Cruz L. E.).

Figura 2. Curvas de sobrevivencia promedio de *A. glabrata* y *B. conferta*, durante el periodo de julio 2021-noviembre 2023.

Figura 3. Porcentaje de supervivencia por especie y por tratamiento (talla chica vs grande) de la última medición (11/11/2023).

Figura 4. Curvas de incremento en altura final promedio de planta (cm) para *B. conferta* y *A. glabrata*.

Figura 5. Gráfico de barras del incremento en altura dependiente de la especie y tamaño inicial en relación al incremento en altura o final de ambas especies.

Figura 6. Análisis de regresión exponencial para la estimación del tiempo que debe transcurrir para que *A. glabrata* y *B. conferta* alcancen la altura de 1m. Las líneas punteadas verticales indican la edad de la plantación a la cual sería recomendable plantar *A. religiosa* bajo las plantas nodriza, una vez que éstas últimas han alcanzado 1 m de altura: 1466 días $\approx$ 4 años; 1640 $\approx$ 4.5 años.

ÍNDICE DE CUADROS CAP. I.

Cuadro 1. Supervivencia promedio en relación especie- talla.

Cuadro 2. Análisis de Varianza para la supervivencia de *B. conferta* y *A. glabrata*. La talla hace referencia al tamaño inicial de planta (grande o chica) y condición al hecho de haber sido plantada la especie de manera individual en cada parcela o bien ambas juntas.

Cuadro 3. Análisis de Varianza para el incremento en altura de planta para *B. conferta* y *A. glabrata*. La talla hace referencia al tamaño inicial de planta (grande o chica) y condición al hecho de haber sido plantada la especie de manera individual en cada parcela o bien ambas juntas.

ÍNDICE DE FIGURAS CAP. II.

Figura 1. Acomodo de bloques en cada una de las diferentes altitudes, marcada la planta inicial con color azul y las siguientes plantas acomodadas con la dirección de las manecillas del reloj. Y acomodo de parcelas en orientación a la pendiente del sitio a 4000 msnm. (Herrejon-Calderon P., 2021).

Figura 2. Localización del sitio de traslado de la planta (dentro del círculo amarillo) cercana a los cuatro sitios del experimento dentro del APFFNT.

Figura 3. Acomodo de las plántulas dentro de los bloques en campo. El panel A, muestra el acomodo de las plantas en una nodriza, en sentido de las manecillas del reloj. Panel B, plántula con su etiqueta.

Figura 4. Panel A: Muestra de medición de altura de la planta, supervivencia y diámetro basal de los individuos. Panel B: Medición del índice de estrés de la planta, basándonos en el aspecto de las plantas.

Figura 5. Panel A: tenemos una imagen representativa de la colocación de los Dataloggers en campo dentro de una caja de protección. Panel B: se puede observar la caja del datalogger. Panel C: trampa de lluvia y toma de la precipitación.

Figura 6. Curvas de supervivencia promedio después de dos años desde su establecimiento en campo dentro del APFFNT, en diferentes altitudes (4000, 3800, 3600 y 3400 msnm).

Figura 7. Supervivencia final a dos años desde su establecimiento en campo dentro del APFFNT, en diferentes altitudes (4000, 3800, 3600 y 3400 msnm).

Figura 8. Distancia de Transferencia Altitudinal de procedencias de *Abies religiosa* en tanto a la supervivencia de planta en los diferentes gradientes altitudinales (4000, 3800, 3600 y 3400 msnm) en relación con las procedencias.

Figura 9. Curvas de supervivencia promedio después de dos años desde su establecimiento en campo dentro del APFFNT, en diferentes altitudes (4000, 3800, 3600 y 3400 msnm).

Figura 10. Supervivencia final a dos años desde su establecimiento en campo dentro del APFFNT, en diferentes altitudes (4000, 3800, 3600 y 3400 msnm).

Figura 11. Distancia de Transferencia Altitudinal de procedencias de *Abies religiosa* en tanto al crecimiento en altura de planta en los diferentes gradientes altitudinales (4000, 3800, 3600 y 3400 msnm) en relación con las procedencias.

Figura 12. Distancia de Transferencia Altitudinal de procedencias de *Abies religiosa* en tanto al vigor de planta en los diferentes gradientes altitudinales (4000, 3800, 3600 y 3400 msnm) en relación con las procedencias.

Figura 13. Diferencia del diámetro basal de *Abies religiosa* entre diciembre del 2021 y febrero del 2022.

Figura 14. Relación Temperatura-Precipitación en la altura de 3400 msnm (2021-2023), en relación con el periodo de referencia (1961).

Figura 15. Relación Temperatura-Precipitación en la altura de 3600 msnm (2021-2023), en relación con el periodo de referencia (1961).

Figura 16. Relación Temperatura-Precipitación en la altura de 3800 msnm (2021-2023), en relación con el periodo de referencia (1961).

Figura 17. Relación Temperatura-Precipitación en la altura de 4000 msnm (2021-2023), en relación con el periodo de referencia (1961).

ÍNDICE DE CUADROS CAP. II.

Cuadro 1. Diferentes procedencias de colecta de semilla en un gradiente altitudinal desde los 3300 a 3552 msnm en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Cuadro 2. Sitios con su respectiva altitud, elevación, coordenadas geográficas, media anual de temperatura (MAT) y media anual de precipitación (MAP) para cada uno de los sitios de ensayo. Las variables climáticas de los sitios corresponden al periodo 2021-2023 tomados de los dataloggers y trampas de lluvia que se colocaron en los sitios.

Cuadro 3. Número de bloques y plantas por bloque en cada uno de los cuatro sitios del experimento.

Cuadro 4. Análisis de Varianza para la supervivencia final de *A. religiosa* comparando las diferentes procedencias en relación con los sitios de plantación.

Cuadro 5. Análisis de Varianza para la altura final de *A. religiosa* comparando las diferentes procedencias en relación con los sitios de plantación.

Cuadro 6. Incremento en altura para *A. religiosa* comparando las diferentes procedencias en relación con los sitios de plantación.

Cuadro 7. Análisis de Varianza para el incremento en el diámetro basal para *A. religiosa* comparando las diferentes procedencias en relación con los sitios de plantación.

Cuadro 8. Temperaturas promedio mínima, media y máxima mensuales en cada altitud.

Cuadro 9. Precipitación promedio mensual por cada sitio de plantación.

RESUMEN GENERAL

En la actualidad es necesario generar y practicar nuevos métodos que nos ayuden a comprender la manera más precisa para proteger y restaurar los bosques de *Abies religiosa* (oyamel) ante su eventual desaparición, tomando en cuenta el cambio climático y los retos que esto implica. Las poblaciones naturales de *Abies religiosa* requieren urgentemente ser desplazados a sitios más altos y fríos, así como disminuir su tasa de mortalidad en las primeras etapas de vida. Con base en lo anterior, se realizaron dos experimentos separados. El primero de ellos con el objetivo de incrementar la tasa de supervivencia de plántulas de oyamel mediante el establecimiento previo de plantas nodrizas. El segundo ensayo se planteó con el objetivo de demostrar la viabilidad de realizar migración asistida a sitios de mayor elevación y con temperaturas más frías. Los resultados obtenidos en el experimento del establecimiento de plantas nodrizas, indican que de las dos especies de arbustos utilizadas para servir como plantas nodrizas (*Baccharis conferta* y *Ageratina glabrata*) ambas tienen una supervivencia e incremento en altura promedio similares a 2.5 años después del establecimiento, el cual fue de 49% y 31.3 cm para *B. conferta* y 42% y 33.2 cm para *A. glabrata*, respectivamente. Mediante una regresión exponencial, se estimó que el tiempo necesario para que ambas especies alcancen 1 m de altura es de 4 a 4.5 años; dicha altura se considera como la mínima necesaria para que dichos arbustos funcionen adecuadamente como nodrizas del oyamel. Con respecto al experimento de transferencia altitudinal de *A. religiosa*, se encontró que las once procedencias responden de buena manera, al subir de su rango natural de distribución entre 200 y 400 msnm sobre el sitio de origen de la semilla a los dos años de su plantación (2021-2023), con una sobrevivencia del 49 y 72%. Pero al subir más allá de 600 m de diferencia altitudinal, las plántulas presentaron índices de supervivencia más bajos (45%) e incluso decremento en la altura de planta final con respecto a la inicial (es decir, perdieron tamaño por daños en las yemas líder), por factores como lo es las bajas temperaturas en el sitio de plantación a una altitud de 4000 msnm y la insuficiencia de plantas que pudieran fungir como nodrizas en este sitio.

Palabras clave: Cambio climático; Supervivencia; Procedencias; Nodrizas; Migración.

ABSTRACT

Nowadays, it is necessary to generate and practice new methods that help us understand the most precise way to protect and restore *Abies divino* (oyamel) forests in the face of their eventual disappearance, taking into account climate change and the challenges that this implies. The natural populations of *Abies religiosa* urgently need to be moved to higher and colder places, as well as to reduce their mortality rate in the first stages of life. Based on the above, two separate experiments were carried out. The first of them with the objective of increasing the survival rate of fir seedlings through the prior establishment of nurse plants. The second trial was planned with the objective of demonstrating the viability of carrying out assisted migration to sites of higher elevation and with colder temperatures. The results obtained in the experiment on the establishment of nurse plants indicate that of the two species of shrubs used to serve as nurse plants (*Baccharis conferta* and *Ageratina glabrata*) both have a similar survival and increase in average height 2.5 years after establishment. which was 49% and 31.3 cm for *B. conferta* and 42% and 33.2 cm for *A. glabrata*, respectively. Using an exponential regression, it was estimated that the time necessary for both species to reach 1 m in height is 4 to 4.5 years; This height is considered the minimum necessary for said bushes to function properly as nurseries for fir. With respect to the altitudinal transfer experiment of *A. religiosa*, it was found that the eleven provenances respond well, rising from their natural range of distribution between 200 and 400 meters above the site of origin of the seed two years after its plantation (2021-2023), with a survival of 49 and 72%. But when climbing beyond 600 m of altitude difference, the seedlings presented lower survival rates (45%) and even a decrease in the height of the final plant with respect to the initial one (that is, they lost size due to damage to the leading buds.), due to factors such as the low temperatures at the plantation site at an altitude of 4000 meters above sea level and the lack of plants that could serve as nurseries at this site.

Keywords: Climate change; Survival; Origins; Nurses; Migration.}

OBJETIVOS

Objetivo General

Generar y establecer experimentos que sirvan para investigar diferentes formas de proteger y restaurar los bosques de *Abies religiosa* ante su degradación y el cambio climático.

Objetivos Particulares

- Evaluar la supervivencia y crecimiento de dos especies de plantas nodrizas producidas en vivero, establecer un dosel y determinar el tiempo estimado en el que alcanzarán una talla adecuada como plantas nodrizas para su uso para futuras reforestaciones de *A. religiosa* dentro de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca.
- Evaluar un experimento de migración asistida de *A. religiosa* de diferentes procedencias altitudinales dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, tomando en cuenta supervivencia, crecimiento, diámetro basal e índice de estrés.

INTRODUCCIÓN GENERAL

Actualmente se sabe que la mayoría de las especies que habitan en el planeta se encuentran amenazadas por cuestiones que son provocadas por el cambio climático, el aprovechamiento desmesurado de los recursos y los bosques de oyamel no son la excepción.

Abies religiosa se distribuye en México principalmente en el Eje Neovolcánico Transversal (Rzedowski, et al., 2006; Pérez-Miranda et al., 2018) en un rango altitudinal entre los 2,400 a 3,500 msnm (Rzedowski et al., 2001; Rzedowski et al., 2006; Encina-Domínguez et al., 2008).

El oyamel es una especie que tiene un papel de suma importancia tanto ecológica, económica, social y cultural. De misma forma que sus poblaciones brindan una gran variedad de servicios ecológicos, como lo son la recarga de los mantos freáticos, captura de carbono, mantienen la diversidad biológica de sus bosques, y uno de los principales objetivos de que permanezca la especie es para asegurar la llegada de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*) durante la temporada invernal (noviembre-marzo), ya que dan refugio a esta mariposa y a su vez son un sostén económico para las comunidades que viven dentro o cerca de ellos, con el aprovechamiento forestal y el ecoturismo.

Debido a su estado de degradación por el cambio en las temperaturas actuales y la tala ilegal (CONANP, 2016), eventos meteorológicos extremos, (Brower et al., 2017) modificación en el régimen del fuego, pastoreo (Saavedra et al., 2003) y cada vez en mayor medida, a plagas (escarabajo descortezador) y enfermedades en *A. religiosa* los cuales generan cambios drásticos en la cobertura y extensión de los bosques.

Ante esta problemática, es necesario generar y establecer experimentos que sirvan para investigar diferentes formas de proteger y restaurar los bosques de *A. religiosa*. Principalmente con nuevas estrategias para la restauración ecológica del bosque, con el objetivo de obtener en sus reforestaciones un índice de supervivencia mayor (Blanco-García et al., 2011).

Por esto se realizaron dos experimentos de manera separada, el primero de ellos en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMM), en el santuario de Sierra Chincua. Dicho experimento se basó en el principio de ayudar al oyamel durante sus

primeras etapas de vida, donde las tasas de supervivencia pueden llegar a ser más altas cuando la especie cuentan con una buena cobertura arbórea (Gallardo-Salazar et al., 2019) y la presencia de especies protectoras para ayudarles a resistir ante factores de temperaturas altas, incidencia solar, heladas y herbívora (Pérez-Cruz, 2022).

El uso de las plantas nodrizas como herramienta en la restauración de los bosques de oyamel

La restauración ecológica de los ecosistemas se entiende como la recuperación integral de la diversidad biológica y las funciones de éstos (Navarro-Cano et al., 2019). Una de las técnicas más novedosas para restaurar los ecosistemas, es utilizar arbustos de sucesión como planta nodriza (Ramírez-Contreras & Rodríguez-Trejo, 2009; Blanco-García et al., 79 2011; Martínez-Arévalo, 2015), ya que tienen una interacción positiva con las especies arbóreas, mediante un proceso facilitador de sucesión ecológica (Sánchez-Velásquez et al., 2011) la cual les ayuda a poder enfrentar las condiciones del medio durante sus primeras etapas de vida (Cavieres et al., 2006).

Utilizar especies arbustivas como plantas nodrizas a su vez incrementa la diversidad vegetal en términos taxonómicos, funcionales y filogenéticos (Navarro-Cano et al., 2019). Tal interacción entre los arbustos que funcionan como nodrizas y las plántulas de especies arbóreas, cuentan con una gran importancia en sitios forestales que, tras varios intentos de reforestación, han tenido bajos porcentajes de supervivencia de los árboles plantados.

Un ejemplo es uno de nuestros sitios de estudio, ubicado en la zona núcleo en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMM, en Sierra Chincua, donde entre febrero de 2015 y mayo de 2016 se registró una pérdida de cobertura forestal de 72.30 hectáreas (ha) de bosques en la zona núcleo: 11.92 ha fueron afectadas por tala clandestina, 53.94 ha por la caída de árboles debida a los vientos de la tormenta del 9 de marzo de 2016 (Brower et al., 2017) y 6.44 ha debidas a la sequía (CONANP, 2016). Posterior a esa tormenta invernal de 2016, durante cinco años se realizaron reforestaciones en las zonas afectadas, mismas que en algunos casos no han tenido el éxito esperado (Carbajal-Navarro et al., 2019).

En el presente experimento se utilizaron dos especies de plantas que se pueden encontrar de manera natural en la RBMM. La primera de ellas es *Baccharis conferta* o por su nombre común “escoba” o “escobilla” (Rzedowski et al., 2001; Gutiérrez-Román et al., 2022). Especie arbustiva puede crecer hasta 3 m de altura, se distribuye en un rango altitudinal de 1,000 a los 3,000 msnm, y su presencia predomina en etapas sucesionales de bosques de *Quercus sp.*, *Pinus sp.* y *A. religiosa*, por lo que se le considera como una especie pionera (Rzedowski et al., 2006; Sánchez-Guzmán et al., 2011). La segunda especie es *Ageratina glabrata* (conocida también como *Eupatorium glabratum* o “palomilla”); es una planta herbácea que puede crecer en forma de arbusto con una altura de 1.5 a 2 m de altura. Esta especie también se le considera como sucesional, ya que cuando hay desmontes, es de las primeras especies en establecerse en los sitios perturbados. Se puede encontrar en los bosques de pino-encino por arriba de los 2000 msnm (Rzedowski et al., 2006; García et al., 2011).

Existen trabajos previos de restauración de oyamel usando a *Baccharis* como nodriza que se han visto beneficiados de manera positiva (Martínez-Arévalo, 2014; Martínez-Arévalo, 2015; Martínez-Arévalo, 2016; Martínez-Arévalo, 2018; Carbajal- Navarro et al., 2019). Sin embargo, en la RBMM no se ha experimentado el establecimiento de un dosel de plantas nodrizas, en sitios perturbados donde los arbustos están esencialmente ausentes.

El objetivo de este trabajo fue determinar la viabilidad, en términos de sobrevivencia y crecimiento, de establecer un dosel arbustivo con *B. conferta* y *A. glabrata* en un sitio altamente perturbado en la Zona Núcleo dentro de la RBMM, en el paraje llamado Monera Alta, Ejido Cerro Prieto. Además de lo anterior, se determinó el efecto en la sobrevivencia y crecimiento de dos tamaños iniciales de planta y la conveniencia o no de plantar ambas especies juntas o separadas dentro de una misma parcela. Por último, se estimó el tiempo que le llevará a los arbustos alcanzar una talla de 1m de altura, mismo que se estima es necesario para que estos funcionen adecuadamente como nodrizas.

La migración asistida como un método de conservación de los bosques de oyamel

El cambio climático está generando un desajuste entre los sitios actualmente ocupados por poblaciones forestales y el clima al que están adaptadas. Debido a esto es necesario comprender los patrones de variación genética entre procedencias a lo largo de gradientes ambientales.

El segundo experimento se centró en cómo las especies vegetales se encuentran en una gran desventaja a comparación de los animales, ya que estas se mueven de manera mucho más lenta y son procesos que van generacionalmente, y en especies tan longevas como lo es *A. religiosa* la situación es aún peor. Una forma para poder restaurar los bosques de forma más rápida y eficaz es coleccionar semilla a lo largo de gradientes altitudinales y producirla en vivero, tratando de elegir procedencias con un clima similar al que ocurrirá en el futuro en el sitio de plantación (Sáenz-Romero et al., 2016; Carbajal-Navarro et al., 2019).

Lo antes mencionado se relaciona con el hecho de que existen patrones en las especies forestales con extensa distribución en gradientes altitudinales que tienden a diferenciarse en el crecimiento en altura de planta, como respuesta a la presión de selección impuesta por el ambiente y que se ven reflejadas en sus características fisiológicas y morfológicas (Zobel y Talbert, 1984; Vallejos et al., 2010). Las plantas originadas de semillas recolectadas a menor altitud tienden a tener un mayor crecimiento que las procedentes de mayor altitud, cuando crecen bajo condiciones favorables (Rehfeldt, 1983). Este tipo de estudios se puede realizar con ensayos de procedencias, que permiten la expresión de las diferencias entre poblaciones mediante el cultivo de plantas de diferentes procedencias bajo las mismas condiciones ambientales (Zobel et al., 2007; Cruzado-Vargas et al. 2021).

En un trabajo de Cruzado-Vargas (et al., 2021) mediante un ensayo de jardín común, se encontró que el efecto de la distancia de transferencia altitudinal climática es altamente negativo cuando las procedencias se desplazan 400 metros hacia abajo a sitios más cálidos y secos; en tal caso, las plantas tienen una supervivencia mucho menor que si se hace hacia sitios 400 metros arriba que su origen, a sitios que son más fríos y húmedos, con una diferencia entre el resultado en supervivencia de ambos movimientos de 50% (95% de supervivencia en sitios 400 metros más altos y 45% de supervivencia en sitios 400 metros más bajos). Se puede decir que el movimiento de las especies se está dando en la búsqueda de sitios más altos y con temperaturas

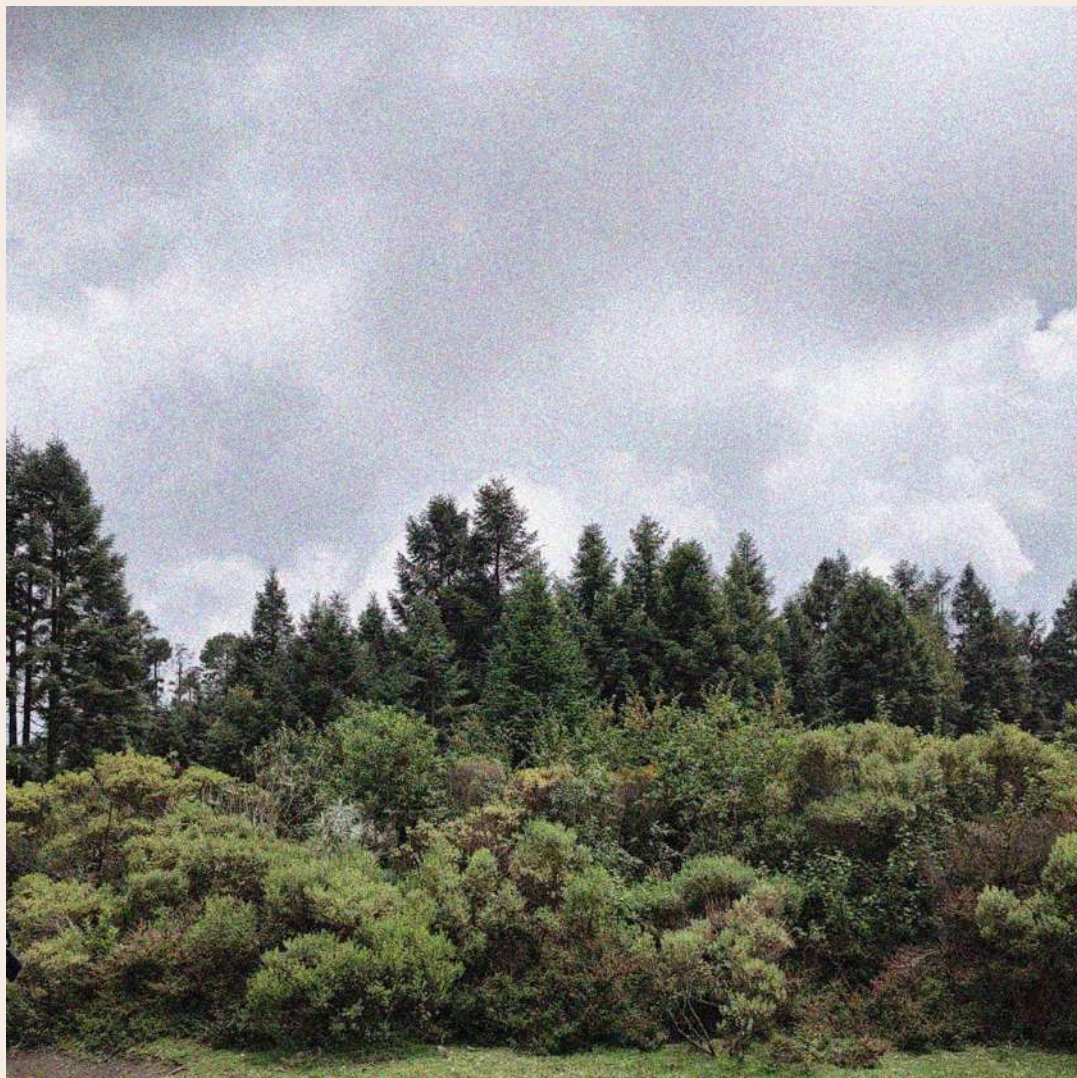
más frías que en un futuro cercano puedan compensar el aumento de temperatura que se está viendo gracias al estrés que viven por este desacoplamiento climático que a su vez favorece la frecuencia e intensidad del desarrollo de plagas y enfermedades (Alfaro et al., 2014). Todos estos cambios en relación con la declinación forestal traería consigo problemas en la hibernación de la mariposa monarca.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto y la viabilidad de la transferencia climática (diferencia climática entre el sitio de origen y el sitio de plantación) sobre la supervivencia, incremento en altura, diámetro basal e índice estrés de las plantas jóvenes de *A. religiosa*, pertenecientes a ocho procedencias altitudinales diferentes, mismas que fueron colectadas en un gradiente altitudinal entre los 3000 a 3500 msnm. Lo anterior se llevó a cabo a través de una reforestación usando además plantas nodrizas nativas preexistentes en los sitios de estudio, donde se plantaron ocho procedencias diferentes de *A. religiosa* en cuatro sitios experimentales ubicados en cuatro altitudes distintas (3400, 3600, 3800 y 4000 msnm).

Adicionalmente, se busca generar información para la toma de decisiones en la transferencia de procedencias con ayuda de la migración asistida, como una estrategia adaptativa hacia el cambio climático que incluya la creación de sitios potenciales de estancia invernal para la mariposa monarca en el APFFNT. Por tanto evaluar la temperatura y precipitación mensual de los sitios, para compararse con un periodo de referencia (1961-1990).

CAPÍTULO I:

Establecimiento de plantas nodrizas para incrementar el éxito de la restauración en bosques de oyamel. (manuscrito sometido a la revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente).



Establecimiento de arbustos como plantas nodrizas para incrementar el éxito de la restauración en bosques de *Abies religiosa*.

Establishment of shrubs as nurse plants to increase the success of restoration of *Abies religiosa* forests

Sección/Categoría: Silvicultura y Manejo/ Ecología Forestal

Autores: Legna Anaid Pérez-Cruz; Luis Eduardo Baltazar-Cruz; Verónica Osuna-Vallejo; Ma. Guadalupe Joaquín-Juan; Arnulfo Blanco-García; Leonel López-Toledo; Cuauhtémoc Saénz-Romero; Ana Gabriela Zacarías-Correa.

Aspectos destacados:

- Los bosques de *Abies religiosa* en la RBMM se encuentran amenazados por el cambio climático.
- Previo a la reforestación se deja el suelo desnudo, resultando en una baja sobrevivencia del oyamel.
- Es necesario plantar arbustos nodriza para mejorar la sobrevivencia de las reforestaciones de oyamel.
- Se estima que para obtener un dosel de nodrizas se necesita de cuatro años previos a plantar oyamel.

RESUMEN

Introducción: Los bosques de *Abies religiosa* (oyamel) en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, hábitat invernal de la mariposa Monarca (*Danaus plexipus*), se encuentran amenazados por el cambio climático, mismo que ha inducido el aumento de brotes de escarabajo descortezador.

Objetivos: Demostrar la viabilidad de establecer un dosel de arbustos, con la finalidad de ser usados como plantas nodrizas para mejorar la sobrevivencia de plántulas de oyamel, como estrategia de restauración ecológica en la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Materiales y métodos: Se establecieron bloques completos al azar con parcelas divididas, en las que se plantaron plántulas producidas en vivero de *Baccharis conferta* y *Ageratina glabrata*, juntas y separadas por parcela, utilizando dos tallas iniciales de planta. Se evaluó la supervivencia y crecimiento durante veintiocho meses.

Resultados y discusión: La sobrevivencia y altura promedio 2.5 años después del establecimiento fue de 49% y 31.3 cm para *B. conferta* y 42% y 33.2 cm para *A. glabrata*, respectivamente. Mediante una regresión exponencial, se estimó que el tiempo necesario para que ambas especies alcancen 1 m de altura, es de 4 a 4.5 años.

Conclusiones: Es viable establecer un dosel de *Baccharis conferta* y *Ageratina glabrata* en sitios altamente perturbados, mediante reforestación con estos arbustos producidos en vivero. Sería necesario plantarlos 5 años previos a la introducción del oyamel, cuando la altura estimada de los arbustos alcance de 1 m de altura, para ser usadas como plantas nodriza en reforestaciones posteriores con *A. religiosa*.

Keywords: *Baccharis conferta*; *Ageratina glabrata*; *Danaus plexipus*; climatic change; sitios perturbados.

Palabras clave: *Baccharis conferta*; *Ageratina glabrata*; *Danaus plexipus*; cambio climático; perturbed sites.

Introducción

Los bosques de oyamel (*Abies religiosa*) de México se distribuyen principalmente en el Eje Neovolcánico Transversal, en la Sierra Madre del Sur, en pequeñas

regiones de la Sierra Madre Occidental y (en menor abundancia) en la Sierra Madre Oriental (Rzedowski, et al., 2006; Pérez-Miranda et al., 2018). Crecen principalmente en un rango altitudinal entre los 2,400 a 3,500 msnm (Rzedowski et al., 2001; Sánchez-González et al., 2005; Rzedowski et al., 2006; Encina-Domínguez et al., 2008). Este ecosistema es importante en términos ecológicos y de interés para la conservación, ya que, entre otras cosas, sus rodales dentro de la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca (en los límites de los estados de Michoacán y Estado de México, centro de México) forma parte del fenómeno migratorio de insectos más grande del mundo, alojando a la mariposa monarca (*Danaus plexipus*) durante su estancia invernal (noviembre-marzo). Actualmente, los bosques de oyamel se encuentran amenazados debido a diferentes factores de degradación, como son algunos eventos esporádicos de tala ilegal (CONANP, 2016), eventos meteorológicos extremos, (Brower et al., 2017) modificación en el régimen del fuego, pastoreo (Saavedra et al., 2003) y cada vez en mayor medida, a plagas (escarabajo descortezador) y enfermedades en *A. religiosa*; todo ello genera cambios drásticos en su cobertura. Por ejemplo, en la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMM), para el período 2003 a 2007, se reportó una pérdida de 250 ha por año en promedio (López-García, 2007). El cambio climático propiciará una disminución significativa de su hábitat climático, debido a que se proyecta un aumento de la temperatura y disminución de la precipitación en su rango de distribución (Sáenz Romero et al 2012). Esto impactará en la reducción del vigor de los árboles, lo que facilitará un aumento en la incidencia de ataque por plagas y enfermedades, como los escarabajos descortezadores (*Scolytus mundus* y *Pseudohylesinus spp.*), que han causado una mortalidad relevante de árboles adultos dentro de la (López-Gómez et al., 2015; Gómez-Pineda et al., 2022). Ante esta problemática, es necesario implementar nuevas estrategias para la restauración ecológica del bosque, mismas que aseguren una mayor supervivencia y crecimiento de las plantas de *Abies religiosa* (Blanco-García et al., 2011).

La restauración de ecosistemas degradados se ha basado tradicionalmente en la reforestación con especies vegetales locales (CONABIO, 2020). Actualmente, la restauración ecológica se concibe como la recuperación integral de la diversidad biológica y las funciones de un ecosistema (Navarro-Cano et al., 2019). Una de

las técnicas más novedosas de restaurar los ecosistemas, es utilizar arbustos de sucesión como planta nodriza (Ramírez-Contreras & Rodríguez-Trejo, 2009; Blanco-García et al., 2011; Martínez-Arévalo, 2015), ya que la interacción positiva que tienen estas plantas en relación con las especies arbóreas representa un proceso facilitador de la sucesión ecológica muy importante (Sánchez-Velásquez et al., 2011). Lo anterior es debido a que las plantas nodrizas brindan protección (y en ocasiones recursos) a plántulas de las especies arbóreas en un ambiente difícil, mientras estas últimas crecen lo suficiente para enfrentar las condiciones del medio durante sus primeras etapas de vida (Cavieres et al., 2006). A escala de paisaje, el establecimiento de especies arbustivas como plantas nodriza incrementa la diversidad vegetal en términos taxonómicos, funcionales y filogenéticos (Navarro-Cano et al., 2019).

La interacción entre los arbustos que funcionan como nodrizas y las plántulas de especies arbóreas, es de vital importancia en sitios forestales que, tras varios intentos de reforestación, han tenido bajos porcentajes de supervivencia de los árboles plantados.

El establecimiento de arbustos para ser usados como plantas nodrizas, consiste en la colecta de rametos o semillas de las especies que se usarán como nodriza, para producir la planta en vivero, misma que después se lleva a los sitios perturbados con la finalidad de establecer un dosel de plantas nodrizas en puntos clave para la restauración, y con antelación al establecimiento del oyamel, como recomiendan algunos trabajos previos (Martínez-Arévalo, 2015, 2016 & 2018; Carbajal-Navarro et al., 2019).

Un ejemplo es la zona núcleo en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMM), en Sierra Chincua, donde entre febrero de 2015 y mayo de 2016 se registró una pérdida de cobertura forestal de 72.30 hectáreas (ha) de bosques en la zona núcleo: 11.92 ha fueron afectadas por tala clandestina, 53.94 ha por la caída de árboles debida a los vientos de la tormenta del 9 de marzo de 2016 (Brower et al., 2017) y 6.44 ha debidas a la sequía (CONANP, 2016). Posterior a esa tormenta invernal de 2016, durante cinco años se realizaron reforestaciones en las zonas afectadas, mismas que en algunos casos no han tenido el éxito esperado (Carbajal-Navarro et al., 2019).

En el presente experimento se utilizaron dos especies de plantas que se pueden encontrar de manera natural en la superficie de la RBMM. La primera de ellas es *Baccharis conferta* o por su nombre común “escoba” o “escobilla” (Rzedowski et al., 2001; Gutiérrez-Román et al., 2022). Esta es una especie arbustiva que crece hasta 3 metros de altura, se distribuye en un rango altitudinal de 1,000 a los 3,000 msnm, y su presencia predomina en etapas sucesionales de bosques de *Quercus* sp., *Pinus* sp. y *A. religiosa*, por lo que se le considera como una especie pionera (Rzedowski et al., 2006; Sánchez-Guzmán et al., 2011). También se cree que *B. conferta* sirve como fuente de hongos ectomicorrícicos para *A. religiosa* (Sánchez-Guzmán et al., 2011; Argüelles-Moyao et al., 2022). La segunda especie es *Ageratina glabrata* (denominada previamente *Eupatorium glabratum*) o “palomilla”; es una planta herbácea de talla pequeña que crece en forma de arbusto con una altura de 1.5 a 2 m, en buenas condiciones de humedad. A esta especie también se le considera como sucesional o colonizadora, ya que cuando hay desmontes, es de las primeras especies en establecerse en los sitios perturbados. Se puede encontrar en los bosques de pino-encino por arriba de los 2000 msnm (Rzedowski et al., 2006; García et al., 2011). Se tienen experiencias previas del uso de *Baccharis* en proyectos de restauración del oyamel y se han visto beneficiados de manera positiva (Martínez-Arévalo, 2014; Martínez-Arévalo, 2015; Martínez-Arévalo, 2016; Martínez-Arévalo, 2018; Carbajal Navarro et al., 2019). En un estudio previo se logró incrementar significativamente la sobrevivencia de plántulas de oyamel, cuando éstas se plantaron bajo la sombra de arbustos preexistentes (principalmente *B. conferta*) que sirvieron como plantas nodriza, en sitios perturbados del área núcleo de la RBMM (Carbajal-Navarro et al., 2019). Sin embargo, en la RBMM no se ha experimentado el establecimiento *de novo* de un dosel de plantas nodriza, en sitios perturbados donde los arbustos están esencialmente ausentes. Un dilema frecuente en los programas de reforestación, es plantar en campo individuos de talla más grande, lo que en ocasiones representa mayores posibilidades de sobrevivencia, pero a un mayor costo en vivero (Alvarado-Sosa et al., 2007). Una alternativa, también es plantar individuos de talla más chica o de menor calidad, que representa menores costos en vivero, pero puede tener menores posibilidades de sobrevivencia (Wightman y Cruz-Blas et al., 2003). Tal balance entre posibilidades de sobrevivencia y costos de producción en vivero, requieren de una etapa de experimentación en campo.

El objetivo de este trabajo fue determinar la viabilidad, en términos de sobrevivencia y crecimiento, de establecer un dosel arbustivo con *B. conferta* y *A. glabrata* en un sitio altamente perturbado (por una tormenta invernal inusual en 2016) en la Zona Núcleo dentro de la RBMM, en el paraje llamado Monera Alta, Ejido Cerro Prieto. Además de lo anterior, se determinó el efecto en la sobrevivencia y crecimiento de dos tamaños iniciales de planta y la conveniencia o no de plantar ambas especies juntas o separadas dentro de una misma parcela. Por último, se estimó el tiempo que le llevará a los arbustos alcanzar una talla de 1m de altura, mismo que se estima es necesario para que estos funcionen adecuadamente como nodrizas.

Materiales y Métodos:

Área de Estudio

El estudio se llevó a cabo en el paraje “Monera Alta”, a una altitud de 3400 msnm (19° 15' 24.89"N, 100° 17' 34.39" O), ubicado en el Ejido Cerro Prieto, municipio de Angangueo, Michoacán, dentro de la Sierra Chincua, Zona Núcleo de la RBMM; misma que está en los límites de los estados de Michoacán y Estado de México (Figura 1). Es un sitio al que habitualmente llegaban colonias de la Mariposa Monarca, dominado originalmente por árboles adultos de *A. religiosa* de gran tamaño, pero cuyo arbolado fue en gran medida derribado por la tormenta invernal de marzo de 2016 (CONANP, 2016). Posterior a ese evento de perturbación, se realizaron varias reforestaciones con planta de oyamel con un bajo porcentaje de supervivencia de los árboles plantados. Aparentemente, los períodos de marzo-mayo que ahora son más secos y cálidos (Cruzado-Vargas et al 2021), y la pedregosidad del sitio, además de su gran altitud, crearon un ambiente adverso para la sobrevivencia de plántulas de oyamel. El sitio de estudio cuenta con una temperatura media anual de 9.2 °C y una precipitación media anual de 1093 mm (estimación climática usando “splines” disponibles en <https://charcoal2.cnre.vt.edu/climate/>, basados en Sáenz-Romero et al 2010).

Producción de planta en vivero

Las nodrizas utilizadas en este experimento fueron individuos de *Baccharis conferta* y *Ageratina glabrata* provenientes de la RBMM, mismos que fueron producidos a partir de estacas de ramas y la germinación de semillas. Posterior a la producción de esquejes y germinación de semillas, las plántulas se mantuvieron en un vivero forestal experimental de la ciudad de Morelia, Michoacán (1989 msnm). En total se obtuvieron individuos mismos a los que se les mantuvo en vivero por un periodo entre 8 a 13 meses de edad en envases rígidos de 380 cm³, para su posterior establecimiento en campo en el mes de julio del año de 2021. En el diseño experimental, no se distinguió entre individuos provenientes de rametos o semillas. Las diferencias en el tamaño de planta se deben mayormente a la implementación de sustratos distintos durante la producción de planta en vivero. De los 720 individuos la mitad de ellos son considerados como planta chica (3.7cm de altura en promedio) y la otra mitad restante como planta grande (8.3 cm).

Diseño experimental

El diseño experimental utilizado en campo fue de bloques completos al azar, con parcelas divididas. Los bloques fueron dispuestos de manera discontinua por las dificultades que representan los afloramientos de roca en el sitio de ensayo. Se establecieron 30 bloques (2 m x 3 m; 6m² c/u), con 6 parcelas (1m² 186 c/u) por bloque. Cada parcela contenía uno de tres tratamientos: i) *B. conferta* de talla grande o chica (7.4 cm ó 4.3 cm promedio, respectivamente) ($\epsilon = 0.2375$), ii) *A. glabrata* de talla grande o chica (9.2 cm ó 3 cm promedio, respectivamente) ($\epsilon = 0.3232$), y iii) parcelas mixtas (*B. conferta* junto a *A. glabrata* de talla grande o chica). Cada parcela tenía 4 plantas dispuestas en una parcela cuadrada de 1 m x 1 m.

Variables Evaluadas

El experimento se evaluó durante veintiocho meses desde su plantación en campo en julio de 2021 y hasta noviembre de 2023. La primera medición, que permitió obtener una medida de referencia inicial de altura de planta, se llevó a cabo a los

cinco meses del inicio del experimento (diciembre del 2021), y después se realizaron de manera bimensual hasta alcanzar los dos años y cuatro meses de edad a la plantación en campo.

Se evaluaron altura y supervivencia de la planta. La supervivencia se registró como viva (1) o como muerta o ausente (0), mientras que la altura se midió al desde el suelo hasta la yema apical líder de cada planta.

Se consideraron en el análisis sólo 26 de los 30 bloques, debido a la perturbación de 4 de ellos por el arrastre de troncos derivados de una corta fitosanitaria en el predio vecino.

Análisis Estadísticos

Se realizó un análisis de varianza con el procedimiento MIXED (Modelos mixtos) para altura de planta y procedimiento GLIMMIX para sobrevivencia, utilizando el programa SAS (SAS Institute, 2014). El modelo estadístico consideró como efectos fijos: i) la especie (*B. conferta* y *A. glabrata*), ii) la condición (especies juntas o separadas), y iii) la talla inicial (planta “grande” o “chica”), con sus respectivas interacciones. Bloque se consideró efecto aleatorio. Esta estrategia de análisis pretende identificar cuál de las dos especies obtuvo una mejor supervivencia y crecimiento, además de establecer si es conveniente plantar las dos especies juntas o separadas, y la conveniencia de producir en vivero planta chica o grande. El modelo estadístico utilizado se muestra a continuación:

$$Y_{ijklm} = \mu + S_i + T_j + C_k + B_l + S_i * T_j + S_i * C_k + T_j * C_k + S_i * B_l + T_j * B_l + C_k * B_l + \epsilon_{ijklm}$$

Donde: μ = media general; S_i = efecto de la i -ésima especie; T_j = efecto de la j -ésima talla de planta; C_k = efecto de la K -ésima condición de la especie; B_l = efecto del l -ésimo bloque; $S_i * T_j$ = interacción de la especie con las dos tallas existentes; $S_i * C_k$ = interacción de las especies con la condición de ser plantadas ambas especies mezcladas o por separado; $T_j * C_k$ = interacción de las tallas iniciales con las diferentes condiciones de plantación (juntas o separadas); $S_i * B_l$ = interacción de las especies en los diferentes

bloques; $T_j * B_l$ = interacción de las tallas con respecto al bloque; $C_k * B_l$ = interacción de las diferentes condiciones con el bloque; ε_{ijklm} = termino de error. $i = 1, 2$; $j = 1, 2$; $k = 1, 2$ (sola o mixta); $l = (1, 2 \dots 26)$; $m = 1, 2 \dots 4$. Notar que se consideraron en el análisis sólo 26 de los 30 bloques, debido a la perturbación de 4 de ellos por el arrastre de troncos derivados de una corta fitosanitaria en el predio vecino.

Predicción de tiempo para alcanzar la talla deseada.

Se realizó un análisis de regresión con el propósito de establecer una fecha estimada en la cual los arbustos de ambas especies alcanzarían 1 m de altura, lo cual se considera una talla suficiente para proveer de una sombra adecuada para posteriormente plantar bajo ella plántulas de oyamel, en base a la observación de un experimento previo con arbustos pre-existentes (Carbajal-Navarro et al 2019). Y de esa manera establecer un tiempo estimado que es necesario esperar entre la plantación de la nodriza y la posterior plantación del oyamel.

$$Y_{ij} = \beta_0 + e^{\beta_1 x_1}$$

β_0 = intercepto; β_1 = coeficiente de "X"; x = edad en días después de la plantación de ambas especies en campo.

Precipitación y temperatura.

Durante el tiempo de evaluación del experimento también se tomaron datos de precipitación del sitio de manera mensual, captando el agua de lluvia en dos garrafones de 20 l con un embudo de diámetro conocido (17 cm), cuya captura de lluvia mensual fue promediada. Se calculó la precipitación dentro del garrafón con respecto al diámetro del embudo, para convertir los mililitros capturados de lluvia a milímetros de precipitación como columna de agua. Considerando el radio del embudo = 8.5 cm, su área es: $3.1416 (8.5 \text{ cm})^2 = 226.98 \text{ cm}^2$. Entonces: $[(\text{ml de lluvia colectada mensual}) / 226.98] \times 10 = \text{mm de lluvia mensual}$ (Cruzado-

Vargas et al., 2019).

Resultados

A dos años cuatro meses del establecimiento de los arbustos pertenecientes a las especies de *B. conferta* y *A. glabrata*, se obtuvo un porcentaje de supervivencia promedio final del 49% para *B. conferta* y de 42% para *A. glabrata* (Figuras 2 y 3). El Análisis de Varianza (ANOVA) de supervivencia indica que existen diferencias significativas para la talla inicial de la planta ($P = 0.0011$; Cuadro 2), donde las distintas tallas de las dos especies no sobrevivieron de igual manera, ya que la planta grande fue la que presentó una mayor supervivencia para ambas especies (relación especie- talla: $P = 0.0106$). Obteniendo valores de mortalidad promedio para la relación antes mencionada observables en el cuadro 1.

Incremento en altura de planta

El Análisis de Varianza (ANOVA) indica que existen diferencias significativas para especie y talla inicial de la planta (Tabla 2), en donde la especie *A. glabrata* creció más que *B. conferta*, y la planta de talla grande incrementó más su altura en el período observado que la planta de talla chica (Figuras 4 y 5).

Identificación del tiempo para alcanzar la talla adecuada

El análisis de regresión en el que se proyecta la altura de planta en relación a la edad en campo, indica que a partir de la fecha de plantación en campo, *B. conferta* para alcanzar 1m de altura requeriría de cuatro años y medio ($r^2 = 0.663$, $p \leq 0.0001$; Figura 7); mientras que para *A. glabrata* se requiere cuatro años con tres meses ($r^2 = 0.6343$, y $p \leq 0.0001$; Figura 7).

Precipitación media mensual en el paraje Monera Alta.

Se realizó la medición sobre la precipitación de manera mensual en el sitio donde se localiza el experimento de las plantas nodrizas dentro de la RBMM en el Santuario de Sierra Chincua.

Discusión

En condiciones naturales es relativamente frecuente que un sitio a reforestar no tenga arbustos que puedan servir como plantas nodrizas locales, es decir, arbustos pre existentes en el sitio, debido a elevados niveles de perturbación, o a la práctica de retirar la “maleza” previo a la plantación del oyamel. La principal aportación de este trabajo es que sienta las bases de una metodología para el establecimiento de arbustos que sirvan posteriormente como plantas nodrizas para el oyamel. También representa una aportación para estimar el tiempo que requiere a los arbustos *A. glabrata* y *B. conferta*, para alcanzar una talla de 1m y que pueda considerarse suficiente para establecer a *A. religiosa* bajo la sombra de su copa.

Considerando la importancia del efecto nodriza de los arbustos sobre el oyamel, y el importante grado de perturbación y la dificultad que impone la importante afloración de rocas del sitio en donde se ensayó el establecimiento de las plantas nodriza (un sitio con arbolado adulto derribado prácticamente en su totalidad por la tormenta invernal de marzo del 2016); se considera que la sobrevivencia obtenida después veintiocho meses de plantación (49% para *B. conferta* y de 42% para *A. glabrata*), es aceptable. Los resultados de sobrevivencia también son alentadores, si los comparamos con los reportados por Hernández-Pineda y colaboradores (2014), donde la especie *Baccharis macrantha* obtuvo una supervivencia total del 31.5% al finalizar el seguimiento en un periodo de un año y cuatro meses.

Se ha encontrado que *B. conferta* puede ejercer fuertes efectos positivos directos o indirectos en plántulas. Por ejemplo, Sánchez-Velásquez et al., (2011), realizaron un estudio en dos áreas abiertas que presentaban *B. conferta*, en

donde se evaluó el efecto de la especie como planta nodriza en la sobrevivencia y el crecimiento de las plántulas de *A. religiosa*, tomando registros de tres variables (altura, cobertura y diámetro de base) durante dos años. Encontraron que la supervivencia no varió significativamente, siendo relevante solamente en las dos condiciones de contraste (65% con *B. conferta* y 55% sin *B. conferta*). Sin embargo, la altura y la cobertura fueron significativamente mayores bajo el dosel de *B. conferta* que sin ella. Con esto se concluye que bajo el dosel de *B. conferta* se promueve el crecimiento, tanto de altura como de cobertura de las plántulas de *A. religiosa*, ofreciendo protección y reduciendo los costos de las plantaciones comerciales o destinadas a la reforestación.

Si bien en nuestro experimento *B. conferta* presentó un incremento en altura inicial superior a *A. glabrata*, en el transcurso de los dos años, *A. glabrata* obtuvo un incremento final ligeramente superior que *B. conferta*. Entonces, al menos durante el tiempo del ensayo (dos años y cuatro meses), es por esto que presentaron diferencias significativas entre especies con respecto al incremento en altura de planta.

La estimación de que se requiere plantar *A. glabrata* con cuatro años de anticipación, y *B. conferta* con 4.5 años de anticipación a la reforestación con oyamel (en la práctica serían cinco años, por la necesidad de plantar al inicio de la temporada de lluvias), en sitios altamente perturbados de *A. religiosa* en la RBMM, haciendo uso de plantas nodriza cuando no están presentes de manera importante, requiere de una planeación a largo plazo, y evidentemente, una mayor inversión económica, que cubra el costo de la producción de planta nodriza en vivero y su plantación, y no solamente contemple la producción en vivero y plantación en campo de planta de oyamel.

Como recomendación general con base en los resultados, podría decirse que los arbustos que se pretende sirvan como plantas nodriza, requieren plantarse con cinco años de anticipación a la plantación con oyamel, en aquellos sitios que carecen de arbustos que puedan servir como plantas nodriza. Esos sitios típicamente pueden ser sitios en donde se llevaron a cabo aprovechamientos forestales y/o cortas fitosanitarias, en los cuales, cuando se arrastran las trozas de los fustes, queda un suelo prácticamente desnudo.

Los resultados no indican diferencias significativas ni en crecimiento ni en sobrevivencia entre plantar en parcelas separadas o parcelas con ambas especies (parcelas mixtas). Sin embargo, este resultado puede ser prematuro, ya que por el tiempo transcurrido (dos años y cuatro meses), el incremento en altura acumulado (en 37.7 cm) y la distancia entre plantas del espaciamiento de plantación (50 cm), no fue posible observar una competencia o interacción relevante entre especies distintas o entre plantas de la misma especie. Por ello, consideramos es necesario esperar más tiempo antes de poder afirmar que se tienen ventajas o desventajas de plantar las especies separadas o en parcelas mixtas, de ser el caso.

Cabe destacar también que algunos autores ya han mencionado la necesidad de mejorar los esfuerzos de reforestación considerando los efectos del cambio climático (Martínez Arévalo, 2016; Honey-Rouse, 2018; Carbajal-Navarro et al., 2019). Ello se lograría incrementando el costo por planta de *A. religiosa*, en el sentido de sumar el costo de la producción y plantación anticipada de arbustos nodriza, a fin de mejorar substancialmente la sobrevivencia de las plántulas de *A. religiosa*. Es decir, en los predios que necesitan ser reforestados, es prioritario primero establecer un dosel de nodrizas que sean producidas en vivero y luego llevadas a campo, como ya lo han mencionado Martínez-Arévalo (2015, 2016, 2018), Sánchez-Velázquez (2011) y Carbajal Navarro et al. (2019). Cabe destacar que, según nuestro monitoreo de la precipitación y temperatura del sitio, podemos decir que la mejor fecha para establecer este tipo de programas sería el mes de julio, ya que es cuando está bien establecida la temporada de lluvia.

Conclusiones

Con base en nuestros resultados, es necesario establecer un dosel de plantas nodriza cinco años previos a la plantación del oyamel para que estas alcancen un tamaño de 1 m de altura y funcionen como nodrizas. Aunque se observó que ambas especies tienen una capacidad de supervivencia similar, se recomienda el uso de *B. conferta*, ya que tiene una copa densa y perenne, además de que se tiene registrado favorece las relaciones micorrícicas con *A. religiosa*.

Existe evidencia de que las plantas nodrizas ayudan al establecimiento de otras especies como el oyamel, y que éstas se ven beneficiadas de manera positiva en la supervivencia de las plántulas durante sus primeras etapas de vida. Por lo anterior, es importante que esta información se haga llegar a las comunidades que pertenecen a la RBMM, para que puedan aplicarlas de manera efectiva junto con las dependencias de gobierno encargadas de los programas de reforestación.

Agradecimientos

Al Financiamiento de: Monarch Butterfly Found (Madison, Wisconsin, USA), American Forests (Washington D.C., USA), el Fondo de Conservación del Eje Neovolcánico, A.C., La Comisión Forestal de América del Norte (a través del USDA-Forest Service) y la Coordinación de la Investigación Científica, UMSNH. Al director actual de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, Ing. Amado Fernández Islas y el director anterior, M. en C. Felipe Martínez Meza, por permitirnos llevar a cabo nuestro trabajo dentro de la Reserva. Al M. en C. Eligio García Serrano, Director del Fondo de Conservación del Eje Neovolcánico A.C., por el gran apoyo que nos brindó para facilitar la colaboración del Ejido Cerro Prieto. A los Comisarios Ejidales Carmen Martínez Colín (actual) y Luis Martínez (previo), y otros ejidatarios (José Luis Martínez Hernández y Marvin Martínez Hernández) que han colaborado en la vigilancia, mantenimiento y evaluaciones de los ensayos. A los estudiantes y egresados de la Facultad de Biología de la UMSNH, José Martel Blanco García, Eder David Vieyra Valenzuela, Alexia R. García, Axel Humberto Cortez Pérez y Luis Gerardo Ruíz Martínez, al igual que al Dr. Gyorgy Eduardo Manzanilla Quijada que han ayudado en la evaluación del ensayo.

Bibliografía

Alvarado-Sosa P., Blanco-García A. & Lindig-Cisneros R. 2007. Test of alternative nursery propagation conditions for *Lupinus Elegans* kunth plants, and effects on field survival. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 30 (2): 201-204. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61030212>

- Argüelles-Moyao A., Benítez M., Escalante A. & Garibay-Orijel R. (2022). Unipartite and bipartite mycorrhizal networks of *Abies religiosa* forests: Incorporating network theory into applied ecology of conifer species and forest management. *Ecological Complexity*. 50: 2-10. DOI: 10.1016/j.ecocom.2022.101002
- Arriola P., V. J., A. Flores G., A. R. Gijón H., T. Pineda O., V. Jacob C. y C. Nieto de Pascual P. 2015. Producción de planta de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en vivero. Folleto Técnico Núm. 19. CENID-COMEF, INIFAP. México, D.F., México. 68 p.
- Blanco-García A., Sáenz-Romero C., Martorell C., Alvarado-Sosa P., & Lindig-Cisneros R. A. (2011). Nurse plant and mulching effects on tree conifer species in a Mexican temperate forest. *Ecological Engineering*. 37: 994–998. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2011.01.012
- Carbajal-Navarro A., Blanco-Gracia A., Navarro-Miranda E., Cruzado-Vargas A., Gómez-Pineda E., Zamora-Sánchez C., Pineda-García F., O'Neill-Greg, Gómez-Romero M., Lindig-Cisneros R., Johnsen K. H., Lobit P., Lopez-Toledo L., Herrerías-Diego Y., & Sáenz-Romero C. (2019). Assisted migration in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 7:421. DOI: 10.3389/fevo.2019.00421
- Cavieres, L. A., Badano, E. I., Sierra A., A.; Gómez G., S. & Molina M., M. A. (2006). Positive interactions between alpine plant species and the nurse cushion plant *Laretia acaulis* do not increase with elevation in the Andes of central Chile. *The New Phytologist*. 169(1):59-69. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01573.x
- CONAFOR. 2013. *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. et Cham.) paquetes tecnológicos. (13 de diciembre de 2023). <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873Abies%20religiosa.pdf>
- CONANP. (2001). Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera Mariposa

- Monarca. (08 de agosto de 2023). https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/40_libro_pm.pdf
- CONANP. (2016). Informe Unesco RB Mariposa Monarca 2016. (09 de diciembre de 2023). <https://iefectividad.conanp.gob.mx/iefectividad/CyEN/RB%20Mariposa%20Monarca/Atributos/INFORME%20UNESCO%20RB%20MARIPOSA%20MONARCA%202016.pdf>
- Cornejo Tenorio, G.; Casas, A.; Farfán, B.; Villaseñor, J. L.; Ibarra Manríquez, G. (2003). Flora y vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. Boletín de la Sociedad Botánica de México. 73: 43-62. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57707304>
- Cornejo-Tenorio G., Ibarra-Manríquez G. (2017). Flora of the core zones of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico: composition, geographical affinities and beta diversity. Botanical Sciences. (2017). 95(1): 103-129. DOI: 10.17129/botsci.803
- Cavieres, L. A., Badano, E. I., Sierra A., A.; Gómez G., S. & Molina M., M. A. (2006). Positive interactions between alpine plant species and the nurse cushion plant *Laretia acaulis* do not increase with elevation in the Andes of central Chile. The New Phytologist. 169(1):59-69. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01573.x
- CONAFOR. 2013. *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. et Cham.) paquetes tecnológicos. (13 de diciembre de 2023). <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873Abies%20religiosa.pdf>
- CONANP. (2001). Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. (08 de agosto de 2023). https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/40_libro_pm.pdf
- CONANP. (2016). Informe Unesco RB Mariposa Monarca 2016. (09 de diciembre de 2023). <https://iefectividad.conanp.gob.mx/iefectividad/CyEN/RB%20Mariposa%20Monarca/Atributos/INFORME%20UNESCO%20RB%20MARIPOSA%20MONARCA%202016.pdf>

20UNESCO%20RB%20MARIPOSA%20MONARCA%202016.pdf

Cornejo Tenorio, G.; Casas, A.; Farfán, B.; Villaseñor, J. L.; Ibarra Manríquez, G. (2003). Flora y vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. Boletín de la Sociedad Botánica de México. 73: 43-62. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57707304>

Cornejo-Tenorio G., Ibarra-Manríquez G. (2017). Flora of the core zones of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico: composition, geographical affinities and beta diversity. Botanical Sciences. (2017). 95(1): 103-129. DOI: 10.17129/botsci.803

Cavieres, L. A., Badano, E. I., Sierra A., A.; Gómez G., S. & Molina M., M. A. (2006). Positive interactions between alpine plant species and the nurse cushion plant *Laretia acaulis* do not increase with elevation in the Andes of central Chile. The New Phytologist. 169(1):59-69. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01573.x

CONAFOR. 2013. *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. et Cham.) paquetes tecnológicos. (13 de diciembre de 2023). <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873Abies%20religiosa.pdf>

CONANP. (2001). Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. (08 de agosto de 2023). https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/40_libro_pm.pdf

CONANP. (2016). Informe Unesco RB Mariposa Monarca 2016. (09 de diciembre de 2023). <https://iefectividad.conanp.gob.mx/iefectividad/CyEN/RB%20Mariposa%20Monarca/Atributos/INFORME%20UNESCO%20RB%20MARIPOSA%20MONARCA%202016.pdf>

Cornejo Tenorio, G.; Casas, A.; Farfán, B.; Villaseñor, J. L.; Ibarra Manríquez, G. (2003). Flora y vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. Boletín de la Sociedad Botánica de México. 73: 43-62. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57707304>

- Cornejo-Tenorio G., Ibarra-Manríquez G. (2017). Flora of the core zones of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico: composition, geographical affinities and beta diversity. *Botanical Sciences*. (2017). 95(1): 103-129. DOI: 10.17129/botsoci.803
- Cavieres, L. A., Badano, E. I., Sierra A., A.; Gómez G., S. & Molina M., M. A. (2006). Positive interactions between alpine plant species and the nurse cushion plant *Laretia acaulis* do not increase with elevation in the Andes of central Chile. *The New Phytologist*. 169(1):59-69. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01573.x
- CONAFOR. 2013. *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. et Cham.) paquetes tecnológicos. (13 de diciembre de 2023). <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873Abies%20religiosa.pdf>
- CONANP. (2001). Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. (08 de agosto de 2023). https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/40_libro_pm.pdf
- CONANP. (2016). Informe Unesco RB Mariposa Monarca 2016. (09 de diciembre de 2023). <https://iefectividad.conanp.gob.mx/iefectividad/CyEN/RB%20Mariposa%20Monarca/Atributos/INFORME%20UNESCO%20RB%20MARIPOSA%20MONARCA%202016.pdf>
- Cornejo Tenorio, G.; Casas, A.; Farfán, B.; Villaseñor, J. L.; Ibarra Manríquez, G. (2003). Flora y vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 73: 43-62. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57707304>
- Cornejo-Tenorio G., Ibarra-Manríquez G. (2017). Flora of the core zones of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico: composition, geographical affinities and beta diversity. *Botanical Sciences*. (2017). 95(1): 103-129. DOI: 10.17129/botsoci.803
- Cavieres, L. A., Badano, E. I., Sierra A., A.; Gómez G., S. & Molina M., M. A.

- (2006). Positive interactions between alpine plant species and the nurse cushion plant *Laretia acaulis* do not increase with elevation in the Andes of central Chile. *The New Phytologist*. 169(1):59-69. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01573.x
- CONAFOR. 2013. *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. et Cham.) paquetes tecnológicos. (13 de diciembre de 2023). <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873Abies%20religiosa.pdf>
- CONANP. (2001). Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. (08 de agosto de 2023). https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/40_libro_pm.pdf
- CONANP. (2016). Informe Unesco RB Mariposa Monarca 2016. (09 de diciembre de 2023). <https://iefectividad.conanp.gob.mx/iefectividad/CyEN/RB%20Mariposa%20Monarca/Atributos/INFORME%20UNESCO%20RB%20MARIPOSA%20MONARCA%202016.pdf>
- Cornejo Tenorio, G.; Casas, A.; Farfán, B.; Villaseñor, J. L.; Ibarra Manríquez, G. (2003). Flora y vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 73: 43-62. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57707304>
- Cornejo-Tenorio G., Ibarra-Manríquez G. (2017). Flora of the core zones of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico: composition, geographical affinities and beta diversity. *Botanical Sciences*. (2017). 95(1): 103-129. DOI: 10.17129/botsci.803
- Cavieres, L. A., Badano, E. I., Sierra A., A.; Gómez G., S. & Molina M., M. A. (2006). Positive interactions between alpine plant species and the nurse cushion plant *Laretia acaulis* do not increase with elevation in the Andes of central Chile. *The New Phytologist*. 169(1):59-69. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01573.x
- CONAFOR. 2013. *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. et Cham.) paquetes

tecnológicos. (13 de diciembre de 2023).
<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873Abies%20religiosa.pdf>

CONANP. (2001). Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. (08 de agosto de 2023).
https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/40_libro_pm.pdf

CONANP. (2016). Informe Unesco RB Mariposa Monarca 2016. (09 de diciembre de 2023). <https://iefectividad.conanp.gob.mx/iefectividad/CyEN/RB%20Mariposa%20Monarca/Atributos/INFORME%20UNESCO%20RB%20MARIPOSA%20MONARCA%202016.pdf>

Cornejo Tenorio, G.; Casas, A.; Farfán, B.; Villaseñor, J. L.; Ibarra Manríquez, G. (2003). Flora y vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. Boletín de la Sociedad Botánica de México. 73: 43-62. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57707304>

Cornejo-Tenorio G., Ibarra-Manríquez G. (2017). Flora of the core zones of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico: composition, geographical affinities and beta diversity. Botanical Sciences. (2017). 95(1): 103-129. DOI: 10.17129/botsci.803

Cruzado-Vargas, A.L., Blanco-García, A., Lindig-Cisneros, R., Gómez-Romero, M., Lopez-Toledo, L., de la Barrera, E. & Sáenz-Romero, C. (2021). Reciprocal Common Garden Altitudinal Transplants Reveal Potential Negative Impacts of Climate Change on *Abies religiosa* Populations in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve Overwintering Sites. Forests, 12(69): 12-19. <https://doi.org/10.3390/f12010069>

Encina-Domínguez J., Encina-Domínguez F., Mata-Rocha E. & Valdés-Reyna J. (2008). Aspectos estructurales, composición florística y caracterización ecológica del bosque de oyamel de la sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. Boletín de la Sociedad Botánica de México. 83: 13-24. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57711109003>

- García-P. G., Del Río-T. R, Guzmán-M. R., Martínez-G. M. I. & Scior T. (2011). Estudios preliminares sobre el efecto analgésico del extracto de hojas de *Ageratina glabrata* en dos modelos térmicos de dolor agudo. Revista Mexicana Ciencias Farmacéuticas. 42(1): 45-51. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57918590005>
- Gómez-Pineda E., W. M. Hammond, O. Trejo-Ramirez, M. Gil-Fernández, C. D. Allen, A. Blanco-García & C. Sáenz-Romero. (2022). Drought years promote bark beetle outbreaks in Mexican forests of *Abies religiosa* and *Pinus pseudostrobus*. Forest Ecology and Management 505: article 119944:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119944>
- Gutiérrez-Román A., Trejo-Tapia G., González-Cortazar M., Jiménez-Ferrer E., Trejo- Espino J. L., Zamilpa A., Ble-González E. A., Camacho-Díaz B. H. & Herrera-Ruiz M. (2022). Anti-arthritic and anti-inflammatory effects of *Baccharis conferta* Kunth in a kaolin/carrageenan-induced monoarthritis model. Journal of Ethnopharmacology. 288: 114996 <https://doi.org/10.1016/j.jep.2022.114996>.
- Hernández-Pineda, Oscar M. Roa-Casas y Francisco Cortés-Pérez. (2014). Crecimiento de *Baccharis macrantha* y *Viburnum triphyllum*, dos especies nativas útiles en restauración ecológica, plantadas en un pastizal andino (Boyacá, Colombia). Biota Colombiana. 15(2): 27-38. <https://www.redalyc.org/pdf/491/49140740003.pdf>
- Honey-Rosés J., Maurer M., Ramírez M. & Corbera E. (2018). Quantifying active and passive restoration in Central Mexico from 1986–2012: assessing the evidence of a forest transition. Restoration Ecology. 26 (6). 1180-1189. <https://doi.org/10.1111/rec.12703>
- López-García, J. (2007). Análisis de cambio de la cobertura forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (2006 – 2007). Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca (WWF y FMCN). Agosto 2007. México, D.F. http://awsassets.panda.org/downloads/071126_eval_forestal_monarca_06_07.pdf

- López-Gómez V., Arreola-Padilla V. & Pérez-Miranda R. (2015). Daños por factores abióticos y bióticos en bosques de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.) de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 6(29): 56-73. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v6n29/v6n29a5.pdf>
- Martínez-Arévalo J. (2014). Sucesión vegetal en bordes de bosques de pinabete (*Abies guatemalensis* Rehder) del occidente de Guatemala. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 5 (23): 64-77. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/342/447>
- Martínez-Arévalo J. (2015). Características in situ y de propagación de seis especies arbustivas utilizadas como plantas nodrizas en la región occidental de Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*. 2 (2). 105-117. <https://doi.org/10.36829/63CTS.v2i2.50>
- Martínez-Arévalo J. (2016). Los bosques de *Abies guatemalensis* Rehder de San Marcos, Guatemala: una oportunidad para su restauración ecológica. *Ciencia, Tecnología y Salud*. 3(1): 27–46. <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/cytes/article/view/265/157>
- Martínez-Arévalo J. (2018). Modelo de negocio de restauración productiva de *Abies guatemalensis* Rehder utilizando plantas nodrizas para su establecimiento. *Ciencia, Tecnología y Salud*. 5(2): 182–188. <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/cytes/article/view/491/412>
- Navarro-Cano J.A., Goberna, M. & Verdú M. (2019). La facilitación entre plantas como herramienta de restauración de diversidad y funciones ecosistémicas. *Ecosistemas*. 28(2): 20-31. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1747>
- Pastor-Sáez J. (2000). Utilización De Sustratos En Viveros. *Terra Latinoamericana*. 17(3): 231-235. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57317307.pdf> Pérez-Miranda R., Romero-Sánchez M.E., González-Hernández, A., Pérez-Sosa E. &

Flores-Ayala E. (2018). Distribución del *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. bajo escenarios de cambio climático en el eje neovolcánico, México. *Agroproductividad*. 10(8): 29-34. <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1071>

Ramírez-Contreras & Rodríguez-Trejo. (2009). Plantas Nodrizas En La Reforestación Con *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 43-48. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v15n1/v15n1a5.pdf>

Rehfeldt. 2006. Research on Forest Climate Change: Predicted Effects of Global Warming on Forests and Plant Climate Relationships in Western North America and Mexico. Consultado: 21 de Noviembre del 2023. Disponible en: <https://charcoal2.cnre.vt.edu/climate/>

Rzedowski G.C de Rzedowski y colaboradores. (2001). Flora fanerogámica del Valle de México. 2a. ed., Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro, Michoacán. 2: 46-47. https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/Flora_del_Valle_de_Mx1.pdf

Rzedowski, J., (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México 162-166. https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf

Saavedra-Romero L., Alvarado-Rosales D., Vargas-Hernández J., Hernández-Tejeda T. (2003). Análisis de la precipitación pluvial en bosques de *Abies religiosa* (HBK.) Schltdl. et Cham., en el sur de la ciudad de México. *Agrociencia*. 37(1): 57-64.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30237106>

Saénz Romero C., Rehfeldt N. L., Crookston P., Duval R., St-Amant J., Beaulieu B. & Richardson. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*. 102: 595-623. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9753-5>

Sáenz-Romero C, Rehfeldt GE, Duval P & Lindig-Cisneros R. (2012). *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*. 275:98-106. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.004>

Sánchez-Velásquez L., Domínguez-Hernández D., Pineda-López M. & Lara-González R. (2011). Does *Baccharis conferta* shrub act as a nurse plant to the *Abies religiosa* seedling?. *The Open Forest Science Journal*. 4(1): 67-70. DOI:10.2174/1874398601104010067SAS Institute. 2014. SAS/STAT (Version 9.4) Computer Software; SAS Institute Inc.: Cary, NC, USA.

SEMARNAT. (2016). Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. (08 de agosto de 2023). <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/reserva-de-la-biosfera-mariposa-monarca-79228>

SEMARNAT. (2019). Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. (08 de agosto de 2023). <https://www.gob.mx/conanp/documentos/reserva-de-la-biosfera-mariposa-monarca209460#:~:text=Reserva%20de%20la%20Bi%C3%B3sfera%20Mariposa,%2C%20Aporo%2C%20Ocampo%20y%20Zitacuaro>.

Wightman K. & Cruz Blas S. 2003. La cadena de la reforestación y la importancia en la calidad de las plantas. *Foresta Veracruzana*. 5(1): 45-51. <https://www.redalyc.org/pdf/497/49750108.pdf>

Anexos

Cuadros

Cuadro 1. Supervivencia promedio en relación especie- talla.

Table 1. Average survival in species-size relationship.

Especie- Talla	Grande	Chica
<i>Baccharis conferta</i>	54.5%	42%
<i>Ageratina glabrata</i>	55%	30%

Cuadro 2. Análisis de Varianza para la supervivencia de *B. conferta* y *A. glabrata*.

La talla hace referencia al tamaño inicial de planta (grande o chica) y condición al hecho de haber sido plantada la especie de manera individual en cada parcela o bien ambas juntas.

Table 2. Analysis of Variance for the survival of *B. conferta* and *A. glabrata*. Size refers to the initial size of the plant (large or small) and the condition of whether the species has been planted individually in each plot or both together.

Fuente de variación	Grados de libertad	Varianza	F	Z	P
Efectos fijos					

Especie	1		0.45		0.5097
Talla	1		13.62		0.0011
Condición	1		1.11		0.3017
Especie * talla	1		6.58		0.0106
Especie * condición	1		2.80		0.0951
Talla * condición	1		0.78		0.3761
Efectos aleatorios					
Bloque	25	0		1	1
Especie*Bloque	25	0.4612		2.55	0.0053
Talla*Bloque	25	0.0078		0.08	0.4679
Condición*Bloque	25	0		1	1

Cuadro 3. Análisis de Varianza para el incremento en altura de planta para *B. conferta* y *A. glabrata*. La talla hace referencia al tamaño inicial de planta (grande o chica) y condición al hecho de haber sido plantada la especie de manera

individual en cada parcela o bien ambas juntas.

Table 3. Analysis of Variance for the increase in plant height for *B. conferta* and *A. glabrata*. Size refers to the initial size of the plant (large or small) and the condition of whether the species has been planted individually in each plot or both together.

Fuente de variación	Grados de libertad	Varianza	F	Z	P
Efectos fijos					
Especie	1		6.26		0.0196
Talla	1		4.58		0.0427
Condición	1		0		0.9585
Especie * talla	1		0.42		0.5197
Especie * condición	1		0.64		0.4263
Talla * condición	1		0.08		0.7718
Efectos aleatorios					

Bloque	25	8.0862	0.52	0.3007
Especie*Bloque	25	24.1325	1.60	0.0550
Talla*Bloque	25	0.4804	0.06	0.4762
Condición*Bloque	25	5.5819	0.66	0.2536

Figuras

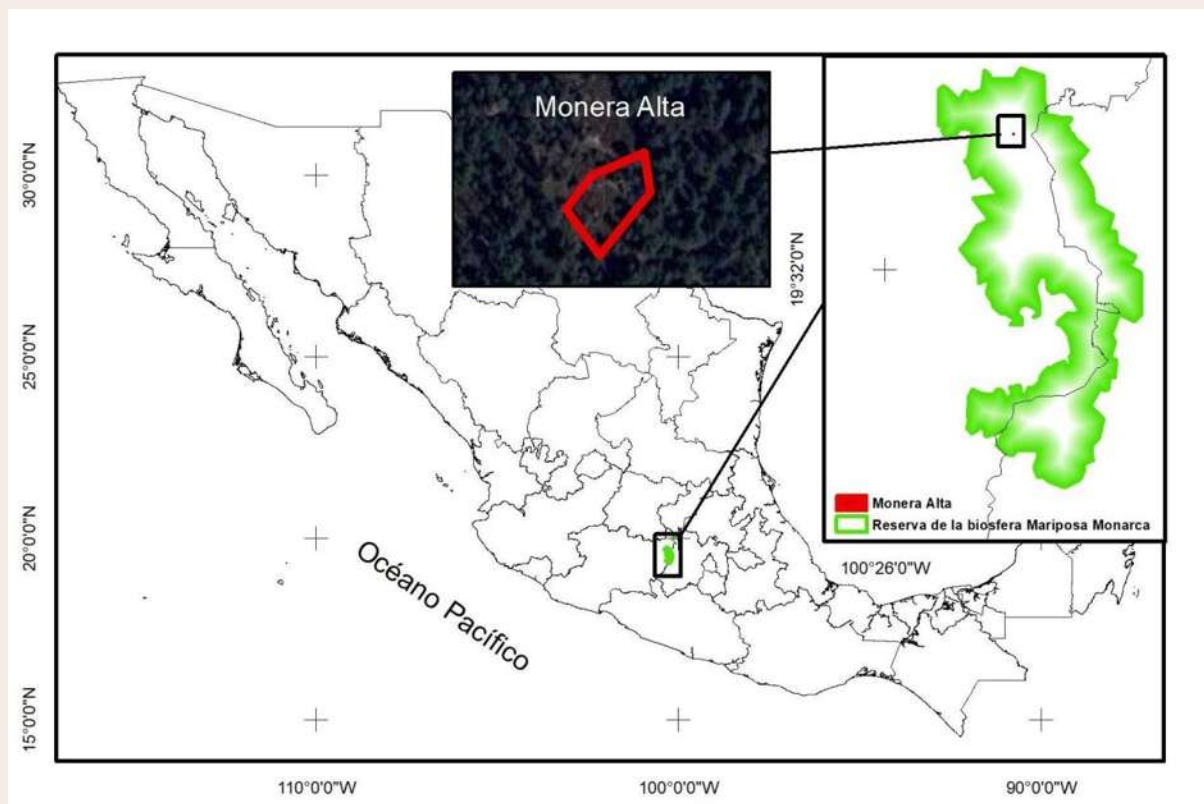


Figura 1. Localización del paraje Monera Alta dentro de la RBMM, en el Ejido de Cerro Prieto, Angangueo Michoacán, México (Mapa realizado por Manzanilla-Quijada G. E. y Baltazar Cruz L. E.).

Figure 1. Location of the Monera Alta area within the RBMM, in the Ejido Cerro Prieto, Angangueo Michoacán, Mexico (Map made by Manzanilla-Quijada G. E. and Baltazar Cruz L. E.).

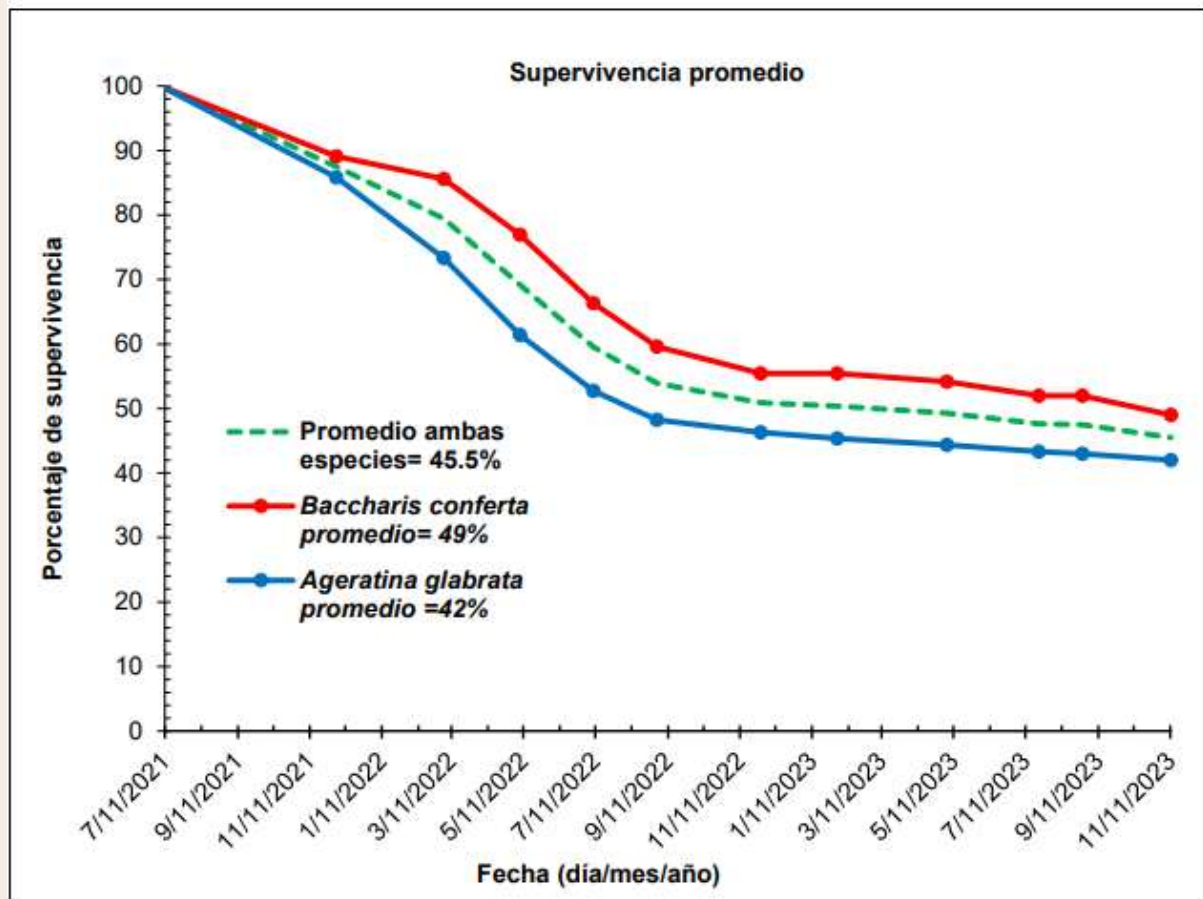


Figura 2. Curvas de sobrevivencia promedio de *A. glabrata* y *B. conferta*, durante el periodo de julio 2021-noviembre 2023.

Figure 2. Average survival curves of *A. glabrata* and *B. conferta*, during the period July 2021-November 2023.

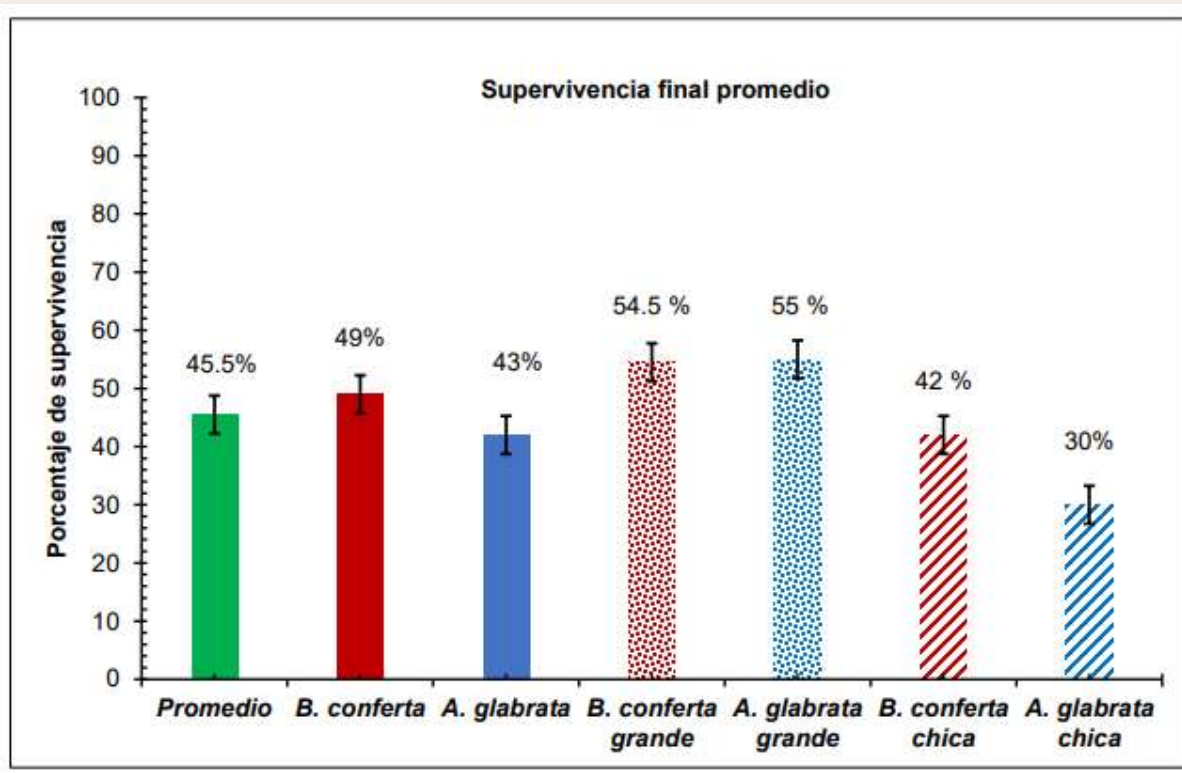


Figura 3. Porcentaje de supervivencia por especie y por tratamiento (talla chica vs grande) de la última medición (11/11/2023).

Figure 3. Survival percentage by species and by treatment (small vs. large size) from the last measurement (11/11/2023).

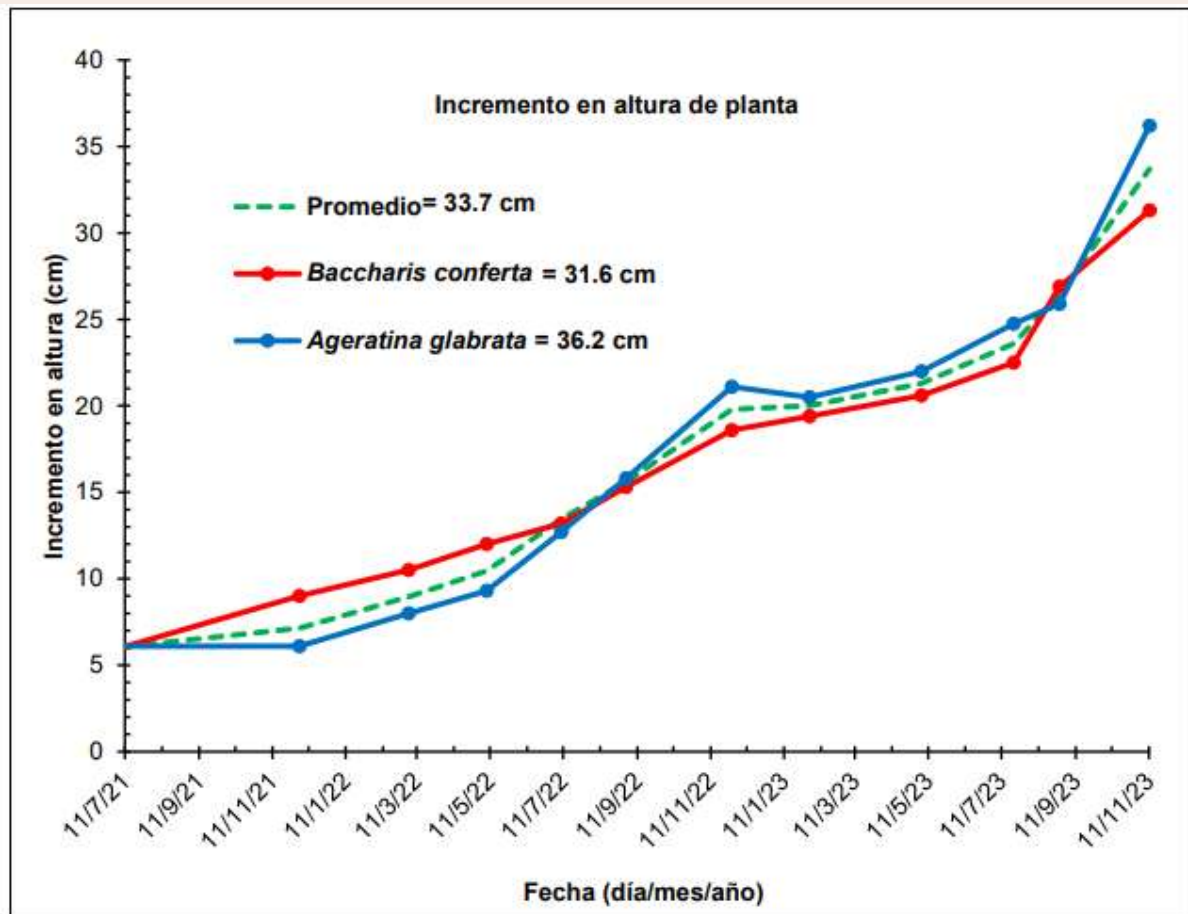


Figura 4. Curvas de incremento en altura final promedio de planta (cm) para *B. conferta* y *A. glabrata*.

Figure 4. Curves of increase in average final plant height (cm) for *B. conferta* and *A. glabrata*.

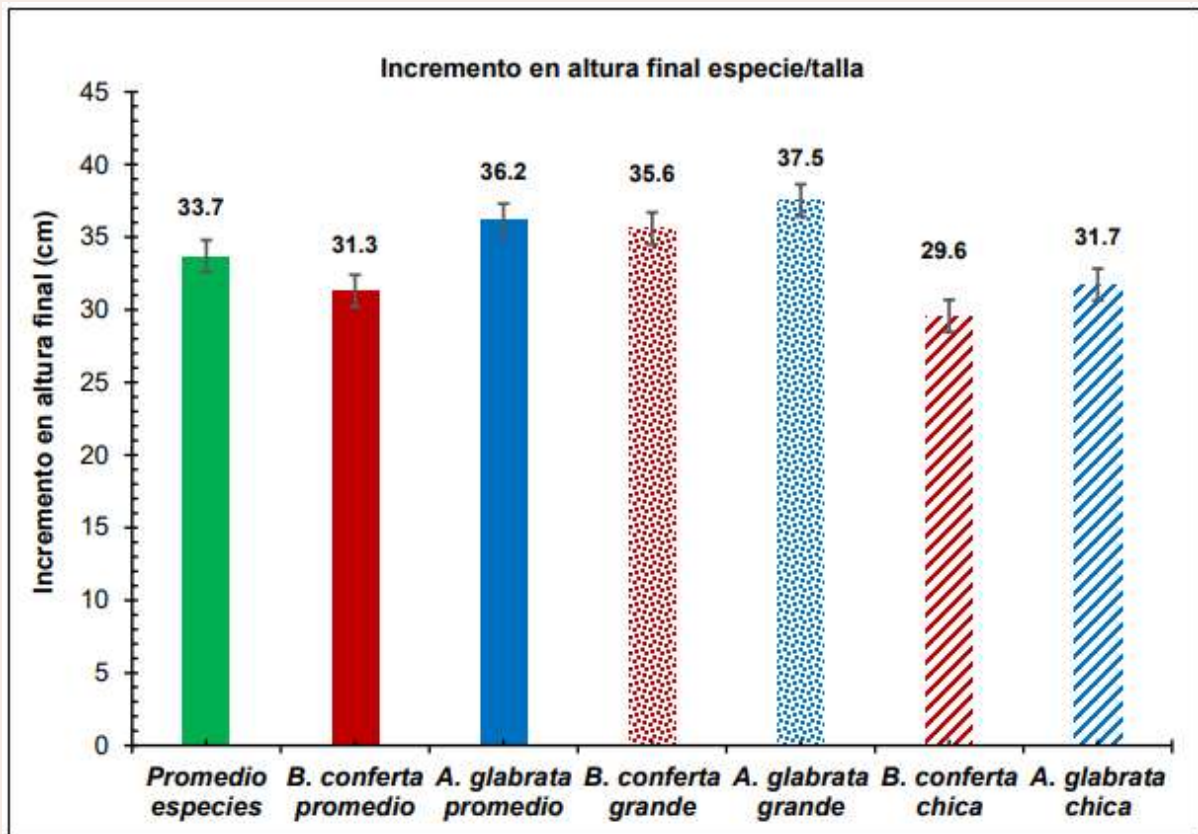


Figura 5. Gráfico de barras del incremento en altura dependiente de la especie y tamaño inicial en relación al incremento en altura o final de ambas especies.

Figure 5. Bar graph of the increase in height dependent on the species and initial size in relation to the increase in height or final of both species.

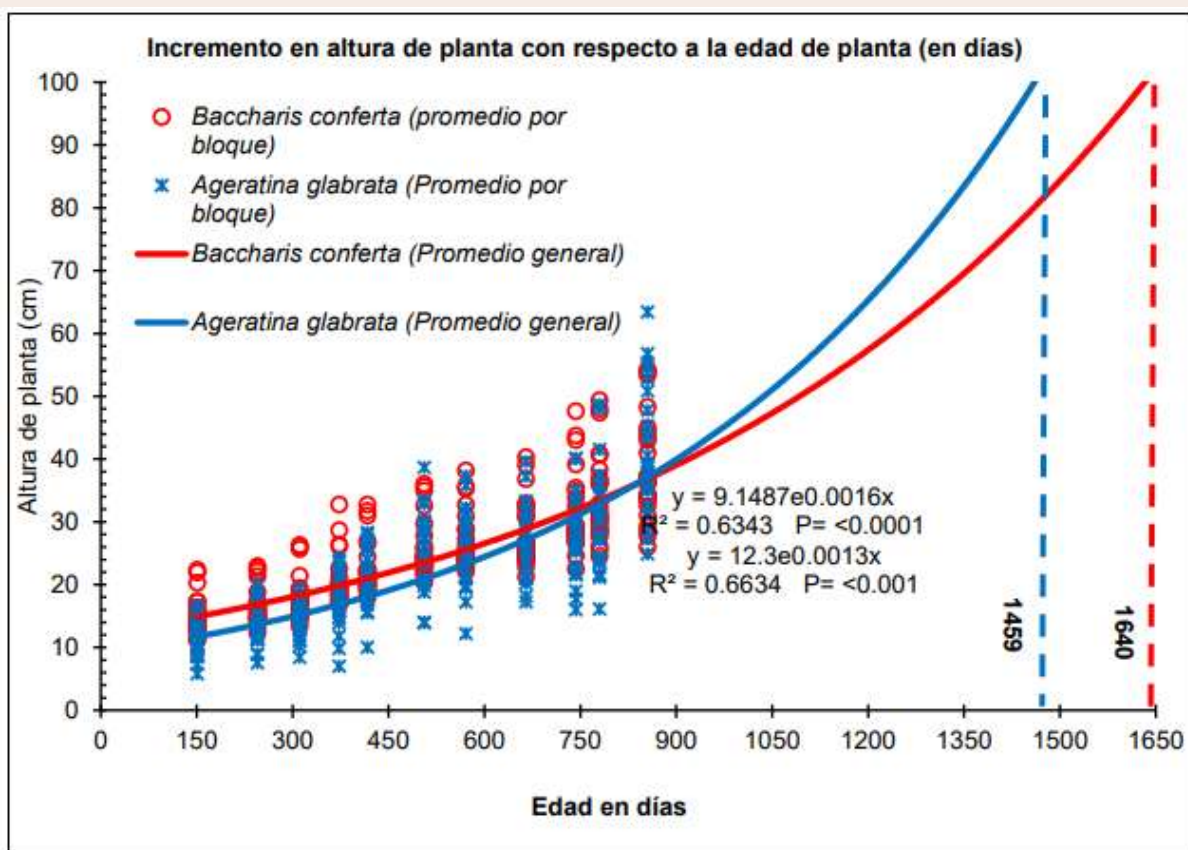


Figura 6. Análisis de regresión exponencial para la estimación del tiempo que debe transcurrir para que *A. glabrata* y *B. conferta* alcancen la altura de 1m. Las líneas punteadas verticales indican la edad de la plantación (en días) a la cual sería recomendable plantar *A. religiosa* bajo las plantas nodriza, una vez que éstas últimas han alcanzado 1 m de altura: 1466 días $\approx$ 4 años; 1640 $\approx$ 4.5 años.

Figure 6. Exponential regression analysis to estimate the time that must elapse for *A. glabrata* and *B. conferta* to reach a height of 1m. The vertical broken lines indicate the age of the plantation at which it would be advisable to plant *A. religiosa* under the nurse plants, once the latter have reached 1 m in height: 1466 days $\approx$ 4 years; 1640 $\approx$ 4.5 years.

CAPÍTULO II:

MIGRACIÓN ASISTIDA DE *Abies religiosa* DE DIFERENTES PROCEDENCIAS ALTITUDINALES DENTRO DEL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA NEVADO DE TOLUCA.



Migración asistida de *A. religiosa* de diferentes procedencias altitudinales dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT).

RESUMEN

Abies religiosa es una especie de conífera que representa gran importancia ecológica y económica, ya que sirve como alojamiento durante el invierno de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*) que proviene de Estados Unidos y Canadá (Pérez-Miranda et al., 2017) y es la segunda especie que contribuye en el sector forestal mexicano (Flores, 2019). Por estas razones es necesario mejorar la gestión de estos bosques basándonos en estrategias que obtengan mejores resultados que las actuales. El cambio climático está generando un desacoplamiento en la distribución de la especie, donde se ha precedido en varios estudios que para la década del 2090 se perderá la cobertura forestal de los bosques de oyamel donde actualmente se distribuyen dentro de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) (Sáenz-Romero et al., 2012).

Por lo anterior, el Nevado de Toluca es de suma relevancia. Dicho estudio se encuentra a 86 km aprox de distancia de la RBMM y forma parte de una cadena montañosa con rango altitudinal superior al de la RBMM, con una altura máxima de 4 660 msnm (Candeau-Dufat & Franco-Maass, 2007).

Con el objetivo de observar cómo responderán las plántulas de oyamel a los métodos de conservación como son la migración asistida y el uso de plantas nodriza, se establecieron cuatro sitios experimentales a diferentes altitudes (3400, 3600, 3800 y 4000 m), lo cual significa un incremento de hasta 400 m con respecto al límite superior altitudinal de la distribución natural de *A. religiosa* (3600 m). En dichos sitios se emplearon plántulas provenientes de ocho procedencias altitudinales (3000 – 3500 m) mismas que se produjeron a partir de semilla recolectada en un gradiente altitudinal dentro de la RBMM, las cuales fueron producidos en vivero entre los años de 2018 y 2020.

Las procedencias plantadas se evaluaron durante dos años, tomando en cuenta la supervivencia, altura e incremento final de planta, el índice de estrés y diámetro basal. Al mismo tiempo, se registró la precipitación y la temperatura de los cuatro sitios de estudio para explorar diferencias entre un período de referencia (promedio 1961-1990) y las condiciones actuales. Se encontró que las plantas reaccionaron con respecto a la altitud en las cuales se plantaron, mostrando una supervivencia e incremento en altura mejor en los sitios más bajos a comparación con los sitios de mayor altitud. Cabe destacar que las procedencias aún no reflejan en un análisis de varianza de manera estadísticamente significativa entre las procedencias sus diferencias para ninguna de las fuentes de variación (altura, supervivencia, diámetro basal e índice de estrés), aunque sí hay una tendencia significativa entre medias por procedencia por sitio en una regresión contra la transferencia altitudinal ($P = 0.02$); por lo cual se recomendaría continuar el estudio por un periodo más prolongado.

Con estos resultados podemos comprobar que es necesario realizar un traslado de poblaciones a sitios más altos que los que se encuentran actualmente.

INTRODUCCIÓN

Los bosques de *Abies religiosa* son de gran importancia ecológica, económica, social y cultural ya que brindan una gran variedad de servicios ecosistémicos, como lo son la recarga de los mantos freáticos, captura de carbono, mantienen la diversidad biológica de sus bosques, dan refugio a la mariposa monarca (*Danaus plexippus*) durante la temporada invernal y son un sostén económico para las comunidades que viven dentro o cerca de ellos, con el aprovechamiento forestal y el ecoturismo (CONANP, 2016).

Actualmente se sabe que la mayoría de las especies que habitan en el planeta se encuentran amenazadas por cuestiones que son provocadas por el cambio climático (Díaz- Cordero, 2012), el aprovechamiento desmesurado de los recursos y los bosques de oyamel no son la excepción. De hecho, las especies vegetales se encuentran en una gran desventaja a comparación de los animales, ya que estas se mueven de manera mucho más lenta y son procesos que típicamente requieren de

varias generaciones, y en especies tan longevas como *A. religiosa* la situación es aún peor.

Una alternativa para restaurar los bosques de forma más rápida y eficaz es coleccionar semilla a lo largo de gradientes altitudinales y producir plantas en vivero, tratando de elegir procedencias con un clima similar al que ocurrirá en el futuro en el sitio de plantación (Sáenz-Romero et al., 2016; Carbajal-Navarro et al., 2019). Lo anterior se debe hacer, ya que hay variación genética entre poblaciones de la misma especie por selección natural, influenciada por los gradientes geográficos y ambientales que se tienen a lo largo del área de distribución y que se ven reflejadas en sus características fisiológicas y morfológicas (Zobel y Talbert, 1984; Vallejos et al., 2010). Existen patrones en las especies forestales con extensa distribución en gradientes altitudinales que tienden a diferenciarse en el crecimiento en altura de planta, como respuesta a la presión de selección impuesta por el ambiente. Las plantas originadas de semillas recolectadas a menor altitud tienden a tener un mayor crecimiento que las procedentes de mayor altitud, cuando crecen bajo condiciones favorables (Rehfeldt, 1983).

El cambio climático está generando un desajuste entre los sitios actualmente ocupados por poblaciones forestales y el clima al que están adaptadas. Debido a esto, es necesario comprender los patrones de variación genética entre procedencias a lo largo de gradientes ambientales. Este tipo de estudios se puede realizar con ensayos de procedencias, que permiten la expresión de las diferencias entre poblaciones mediante el cultivo de plantas de diferentes procedencias bajo las mismas condiciones ambientales (Zobel et al., 2007; Cruzado-Vargas et al. 2021).

En un estudio realizado por Cruzado-Vargas (et al., 2021) en un ensayo de trasplantes recíprocos, se encontró que el efecto de la distancia de transferencia altitudinal climática es altamente negativo cuando el desplazamiento es de 400 metros hacia abajo a sitios más cálidos y secos; en ese caso, las plantas tienen una supervivencia mucho menor que si la transferencia se hace hacia sitios 400 metros más altos, fríos y húmedos (95% de supervivencia en sitios 400 metros más altos y 45% de supervivencia en sitios 400 metros más bajos). En general, para las poblaciones forestales, se ha reportado un patrón de variación de crecimiento en el que las procedencias originadas en la parte más fría (mayor altitud) de la distribución

natural expresan un menor potencial de crecimiento en altura, pero una mayor resistencia al daño por heladas. En contraste, las de la parte baja de la distribución altitudinal (poblaciones originadas en altitudes bajas), presentan un mayor potencial de crecimiento pero una menor resistencia a las heladas (Cruzado-Vargas et al. 2021). Entonces se puede decir que el movimiento de las especies se está dando en la búsqueda de sitios más altos y con temperaturas más frías que en un futuro cercano puedan compensar el aumento de temperatura que se está ocurriendo. El estrés que viven las plantas por este desacoplamiento climático favorece la frecuencia e intensidad del desarrollo de plagas y enfermedades (Alfaro et al., 2014), creando así un declive forestal a gran escala.

Debido al aumento de temperatura proyectado y la disminución de las precipitaciones, *A. religiosa* deberá moverse altitudinalmente hacia sitios de 300 a 500 m más altos para el año 2060 (Gómez-Pineda et al., 2020). Todos estos cambios en relación con la declinación forestal traerían consigo problemas en la hibernación de la mariposa monarca. Es por ello que el desplazamiento asistido de fuentes de semillas hacia altitudes más altas (a través de programas de reforestación) parece ser una opción a considerar como estrategia de manejo adaptativo al cambio climático.

Con respecto a la problemática que viven los bosques de oyamel, este proyecto tiene como objetivo evaluar los efectos y la viabilidad de la transferencia climática (diferencia climática entre el sitio de origen y el sitio de plantación) sobre la supervivencia, incremento en altura, diámetro basal e índice estrés de las plantas plántulas jóvenes de *A. religiosa*, pertenecientes a ocho procedencias diferentes, mismas que fueron colectadas en un gradiente altitudinal entre los 3000 a 3500 msnm. Esto a través de una reforestación usando como protección plantas nodrizas nativas de los sitios de estudio con ocho procedencias diferentes de *A. religiosa* a cuatro altitudes (3400, 3600, 3800 y 4000 msnm). Con la finalidad de generar información para la toma de decisiones en la transferencia de procedencias con ayuda de la migración asistida, como una estrategia adaptativa hacia el cambio climático que incluya la creación de sitios potenciales de estancia invernal para la mariposa monarca en el APFFNT.

HIPÓTESIS

Para contrarrestar los efectos que presenta el cambio climático, el uso de la migración asistida de *A. religiosa* en un gradiente altitudinal (3400, 3600, 3800 y 4000 msnm) bajo la protección de un arbusto nodriza (*Senecio cinerarioides*), superando su distribución natural altitudinal máxima (3600 msnm), reflejará que las plantas dentro de un rango climático similar al de su lugar de origen obtendrán una mejor supervivencia y crecimiento, y un menor grado de estrés. A su vez las que se encuentren más alejadas a su clima original tendrán un efecto a la inversa (menor crecimiento y mayor mortalidad).

OBJETIVOS

Objetivo General

Explorar las posibilidades de éxito del establecimiento de *Abies religiosa* con un traslado altitudinal de sus poblaciones hasta 400 metros sobre su límite altitudinal natural actual (aproximadamente 3600 msnm) mediante la migración asistida, utilizando como protección plantas nodriza nativas en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

Objetivos Específicos

- Determinar la respuesta (en supervivencia, crecimiento, diámetro basal e índice de estrés) de las plantas de *A. religiosa* en un gradiente altitudinal (3400, 3600, 3800 y 4000 msnm).
- Determinar la viabilidad de migrar a la especie 200 y 400 metros sobre su límite altitudinal natural actual (3600 msnm) mediante migración asistida, con protección de plantas nodrizas.
- Registrar y comparar las condiciones climáticas de los sitios de plantación, recolectando datos de temperatura.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este experimento se realizó dentro del Área de Protección de Flora y Fauna del Nevado de Toluca (APFFNT). Adscrito en 1935 como “Parque Nacional Nevado de Toluca”, pero en octubre del 2013 se restableció como “Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca”, con la finalidad de que las comunidades puedan participar en actividades de aprovechamiento sustentable del ANP (Toscana-Aparicio & Granados Ramírez, 2015). El Nevado de Toluca se encuentra dentro del Eje Neovolcánico, con una altura entre los 3000 a 4600 m.s.n.m., siendo la cuarta montaña más alta del país, rodeado por los municipios de: Almoloya de Juárez, Amanalco de Becerra, Calimaya, Coatepec Harinas, Temascaltepec, Tenango del Valle, Texcaltitlan, Toluca, Villa Guerrero y Zinacantepec; a 43 kilómetros al suroeste de la Ciudad de Toluca (CEPANAF, 2023). La morfología actual del Nevado de Toluca se caracteriza por dos crestas elevadas llamadas el Pico del Fraile (4680 msnm) y el Pico del Águila (4550 msnm), en esta última mencionada existen dos cuerpos de agua separados por un domo riolítico (llamados Lagos del Sol y de la Luna). Las laderas montañosas del volcán presentan pendientes pronunciadas que tienden a suavizarse en las porciones inferiores. El tipo de suelo dominado por materiales piroclásticos con flujos lávicos de basaltos y rocas andesitas del cuaternario con planicies aluviales, formadas por andosoles, cambisoles, regosoles, luvisoles y feozem (Darlington, 1957; Villers Ruíz & López Blanco, 1995).

Esta ANP presenta una biota con afinidades de regiones neártica y neotropical, Sus ecosistemas forestales, comprenden bosques de pino, encino, oyamel y aile, así como pastizales alpinos (CONANP, 2016). Es catalogada con un clima semi frío presentando temperaturas medias anuales se encuentra entre los -2 y 5°C sobre los 4000 msnm, 5 y 12°C entre las altitudes de 3300 a 4000 msnm y mayores a 18°C en las faldas del APFFNT, con lluvias en verano (Villers Ruíz & López Blanco, 1995). La precipitación media anual entre los meses de lluvias (junio- septiembre) ronda entre los 200- 250 mm por mes y con una media anual de 1200 a 1500 mm (INEGI, 1983; Villers Ruíz & López Blanco, 1995).

Recolección de semillas y producción de planta.

La colecta de semilla y producción de la planta perteneciente a las ocho procedencias se puede encontrar en Cruzado-Vargas y colaboradores (2021).

Tabla 1. Diferentes procedencias de colecta de semilla en un gradiente altitudinal desde los 3300 a 3552 msnm en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Número de Procedencia	Altitud (msnm)	Lat. N	Long. W
2	3491	19° 34' 04.1"	100° 13' 59.5"
3	3457	19° 34' 17.1"	100° 14' 08.2"
5	3364	19° 34' 31.7"	100° 14' 03.8"
6	3300	19° 34' 46.2"	100° 13' 53.6"
7	3233	19° 34' 50.9"	100° 13' 26.6"
8	3210	19° 34' 52.6"	100° 13' 15.5"
9	3143	19° 34' 53.0"	100° 12' 53.1"
10	3099	19° 35' 12.0"	100° 12' 52.9"

Diseño experimental

Para todos los sitios se usaron plántulas producidas por Cruzado-Vargas, et al (2021), donde fueron colectadas semillas de *A. religiosa* a lo largo de un gradiente altitudinal, de 3099 a 3491 msnm, dentro de la RBMM (Tabla 1). Obteniendo un total de 8 procedencias, las cuales fueron producidas en una casa sombra en el Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales (INIRENA; 19°41'23.02"N, 101°15'0.87"O, 1899 msnm), Morelia, Michoacán, permaneciendo ahí por dos años. Posteriormente las plántulas fueron trasladadas a un vivero en el ejido La Mesa, Edo. de México, a 3000 msnm dentro de la zona de amortiguamiento de la RBMM, donde estuvieron por un año más (tres años en total antes de plantarse en campo). Para el

ensayo de procedencias en campo fueron utilizadas solamente 8 de las 11 procedencias iniciales (Tabla 1).

Se utilizó un diseño con algunos bloques completos (todas las procedencias quedaron representadas en el sitio 3800) y algunos bloques quedaron incompletos. Para el sitio más alto se crearon tres parcelas incompletas adicionales. Todos los bloques antes mencionados fueron aleatorizados en cuanto a la ubicación de las procedencias dentro de ellos, donde los bloques tenían (en general) una sola plántula por procedencia.

La colecta de datos de altura de planta, sobrevivencia y estrés, se realizó de manera bimensual o trimestral. los cuales se concentraron en una base de datos en Excel, mismos que luego fueron utilizados en el análisis estadístico.

Acomodo de bloques y parcelas.

Como se mencionó en la descripción del área de estudio se cuenta con cuatro sitios de establecimiento del experimento (3400, 3600, 3800 y 4000 msnm), donde en los primeros tres sitios (de 3400 a 3800 msnm) se contaron con 30 bloques (del 1 al 90) y en el último sitio (4000 msnm) se colocaron solo 13 bloques y tres parcelas (por insuficiencia de disponibilidad de planta). Cada bloque tiene un acomodo desde una planta inicial (cada planta fue asignada de manera aleatoria) y la colocación de las procedencias fue con dirección hacia la derecha (en el sentido de las manecillas del reloj). Y en tanto a las parcelas (únicamente en el sitio a 4000 m) se colocaron 20 plantas con un acomodo en zigzags, como se puede ver en la figura dos.

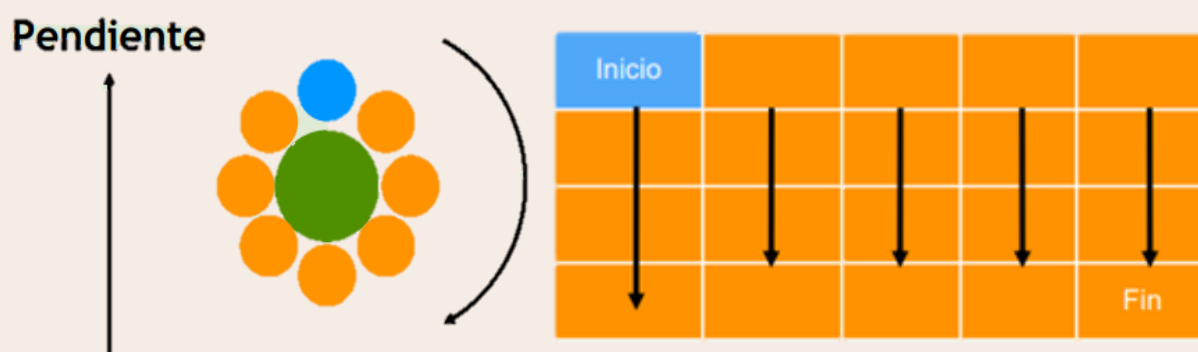


Fig 1. Figura izquierda: Acomodo de planta de *A. religiosa* en bloques (de forma circular) en cada una de las diferentes altitudes, marcada la planta inicial con color azul y las siguientes plantas acomodadas con la dirección de las manecillas del reloj. El diagrama de la derecha indica el acomodo de parcelas adicionales incompletas en orientación a la pendiente del sitio a 4000 msnm. (Herrejon-Calderon, 2021).

Establecimiento en campo

La primera parte del experimento fue el traslado de la planta de *A. religiosa* el día 5 de julio de 2021 desde el Ejido La Mesa dentro de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMM), a la Comunidad de Calimaya, Estado de México, en la parte baja del Nevado de Toluca, cerca de la ciudad de Toluca (capital del Estado) y Metepec (Figura 3).

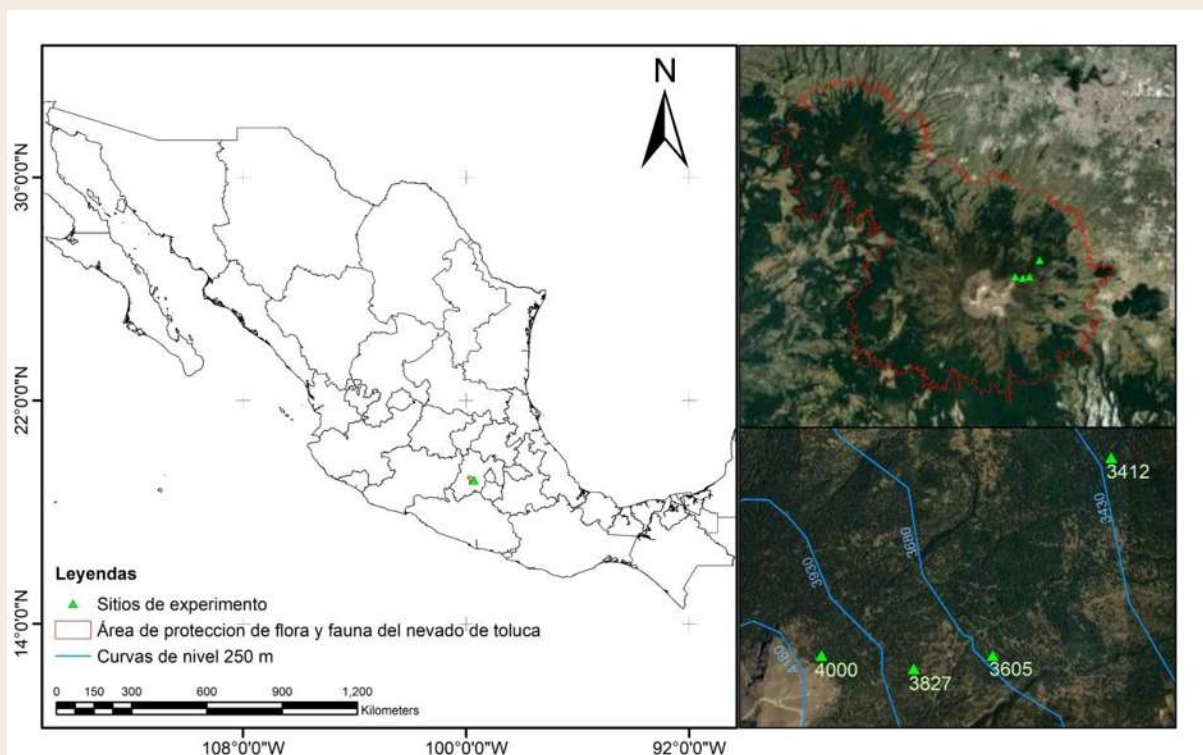


Figura 2. Localización de los sitios de traslado de la planta (triángulos verdes) del experimento dentro del APFFNT (límite del Area Natural protegida en contorno rojo).

Se establecieron cuatro sitios experimentales a diferentes gradientes altitudinales, con una diferencia de 200 metros de altitud entre cada uno de ellos, iniciando a los 3400, 3600, 3800 y 4000 msnm, como se puede observar en la figura 4. El sitio “cuatro” a 3400 msnm, parte superior de la distribución de *A. religiosa*; el sitio “tres” a 3600 msnm, siendo el límite altitudinal superior extremo de la especie con sólo unos pocos individuos dispersos cercanos y a menor altitud que el sitio de plantación; el sitio “dos” a 3800 msnm, más allá del límite altitudinal superior de la especie y por último el sitio “uno” a 4000 msnm, justo en el límite arbóreo y mucho más allá del límite altitudinal superior de la especie (Tabla 2).

Tabla 2. Sitios de plantación con su respectiva altitud, elevación, coordenadas geográficas, media anual de temperatura (MAT) y media anual de precipitación (MAP) para cada uno de los sitios de ensayo. Las variables climáticas de los sitios corresponden al periodo 2021-2023 tomados de los dataloggers y trampas de lluvia que se colocaron en los sitios.

Localización de los sitios del ensayo de procedencias.					
Sitio	Altitud (msnm)	Latitud (N)	Longitud (W)	MAT (°C)	MAP (mm)
Barranca Seca	3400	19° 08' 30.7"	99° 42'	8.01	1060
Paredón Blanco	3600	19° 07' 38.2"	99° 43' 15.1"	6.77	1016
Las Peñas	3800	19° 07' 32.3"	99° 43'	6.28	1015
Las Peñas B	4000	19° 07' 35.4"	99° 44' 0.1"	5.38	998

El experimento se estableció los días 6 y 7 de julio de 2021, en los sitios antes mencionados. Se establecieron 30 bloques cada uno con 8 procedencias (240 plántulas por cada sitio); en general con una procedencia por bloque (recolectadas a lo largo de un gradiente altitudinal en la RBMM), algunos bloques tenían dos plántulas de la misma procedencia por falta de plántulas suficientes de todas las procedencias

(Figura 3A). Estas se establecieron como se explica en la figura 2, plantadas en forma circular en torno al tallo del arbusto que sirve como planta nodriza, bajo la sombra de arbustos existentes, en nuestro caso la especie *Senecio cinerarioides*. Cabe destacar que en el sitio 4000, debido a la insuficiencia de plántulas, se sembró únicamente 13 bloques con 5 plántulas cada uno, una plántula por procedencia. A su vez se sembraron también tres parcelas adicionales, sin un diseño formal de bloques al azar (65 plántulas en bloques formales + 67 en parcelas informales = 130 plántulas en ese sitio). En total se sembraron 852 plántulas de *A. religiosa* y los sitios fueron previamente cercados (Tabla 3).



Figura 3. Acomodo de las plántulas en una disposición circular dentro de los bloques en campo. El panel A, muestra el acomodo de las plantas bajo la sombra de un árbol joven sirviendo como planta nodriza, en sentido de las manecillas del reloj. Panel B, plántula dos años después de plantada con su etiqueta.

Tabla 3. Número de bloques y plantas por bloque en cada uno de los cuatro sitios del experimento.

Barranca Seca	Sitio 1	30 bloques con 5 procedencias 5, 6 y 10; triplicando proc. 2 y duplicando 8.	Bloque: 61-90
Paredón Blanco	Sitio 2	18 bloques incompletos, sin proc. 10, duplicando la proc. 8.	Bloque: 31-60

		• 8 bloques incompletos, sin proc. 5, 6 y 10, triplicando la proc. 2 y duplicando la 8. • 4 bloques incompletos, sin proc. 5 y 10, duplicando la 2 y 8.	
Las Peñas	Sitio 3	• 14 bloques completos (todas las procedencias representadas en cada bloque) • 16 bloques incompletos, sin proc. 10 duplicando la proc. 8.	Bloque: 1-30
Las Peñas B	Sitio 4	• 13 bloques con 5 procedencias (2, 3, 7, 8 y 9) • 3 parcelas adicionales rectangulares, dos de ellas con 20 plantas y una con 27.	Bloque: 91-113

Variables evaluadas

El experimento se estableció en julio del año 2021 y se evaluó durante un periodo de dos años, en periodos bimensuales, siendo su última colecta de datos en julio de 2023. Las variables que se evaluaron fueron: supervivencia de planta, incremento en altura y diámetro basal del tronco e índice de estrés en la planta desarrollado por Carbajal-Navarro (2019) y colaboradores para evaluar el estado físico de las plantas (figura 4A y 4B). Este índice visual de estrés contiene valores que van de 1 a 6, donde, el nivel 1 representa una planta en excelente estado y el nivel 6 representa el daño máximo (planta muerta). Estas mediciones sirven para determinar si existe diferencia entre los sitios experimentales y entre las procedencias de las plantas. La altura de la planta se midió con una precisión en milímetros desde la base hasta la punta de la yema apical. El diámetro basal se midió en la base del tallo con un vernier digital (KNOVA®, Cupertino, CA, EE. UU.) con una precisión de 0.1 mm. Al igual que se tomaron datos de precipitación mensual de los sitios y temperaturas diarias.



Figura 4. Panel A: Muestra de medición de altura de la planta, supervivencia y diámetro basal de los individuos. Panel B: Medición del índice de estrés de la planta, basándonos en el aspecto de las plantas (de izquierda a derecha, plántula sana hasta plántula aparentemente muerta).

Datos climáticos

Se realizó la medición de la temperatura en cada uno de los sitios colocando de dos a tres dataloggers (HOBO Pendant® Data Logger de Temperatura/Luz, 8K) por sitio, para registrar la temperatura de manera constante cada media hora, entre los periodos de medición de las plantas (figura 5A y 5B). También se colocaron dos trampas de agua de lluvia por sitio (garrafones de agua con un embudo de diámetro conocido), ver figura 5C, para determinar la precipitación de los sitios, tomando mediciones cada mes y promediando los resultados de las dos trampas de agua de lluvia para cada paraje.



Figura 5. Panel A: tenemos una imagen representativa de la colocación de los Dataloggers en campo dentro de una caja de protección. Panel B: se puede observar la caja del datalogger. Panel C: Cosecha de lluvia y toma de la precipitación de la trampa de lluvia.

Nuestras mediciones de temperatura se compararon con datos climáticos de los sitios del experimento para el período de referencia 1961–1990 a través de modelos spline climáticos (Sáenz-Romero et al., 2010), disponibles en el sitio web (<https://charcoal2.cnre.vt.edu/climate/>). A partir del clima de las procedencias y de los sitios de prueba de campo, se realizó una función de la distancia de transferencia climática y altitudinal (DTC o $DTA = \text{clima o altitud del sitio de prueba} - \text{clima o altitud de la fuente de la procedencia}$) para representar el impacto de las procedencias de *A. religiosa* en un sitio con un clima (o altitud) diferente al del origen de la semilla.

Análisis estadísticos

Se realizó un análisis de varianza con el procedimiento GLM para altura e incremento en altura de planta y procedimiento GLIMMIX para sobrevivencia, utilizando el programa SAS (SAS Institute, 2014). Comparando las procedencias de las semillas (8 en total), los sitios experimentales con sus respectivas altitudes (3400, 3600, 3800 y 4000 msnm), con sus respectivas interacciones. Esta estrategia de análisis pretende

identificar cómo la distancia de transferencia altitudinal para las procedencias afecta su crecimiento y supervivencia en *A. religiosa*, además de establecer El modelo estadístico utilizado se muestra a continuación:

$$\gamma_{ijk} = \mu + Si + P_j + \beta_k (Si) + Si * p_j + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

γ_{ijk} = observación de la *i*-ésima plántula en el *i*-ésimo sitio de la *j*-ésima procedencia en el *k*-ésimo bloque; μ = media general; Si = efecto del *i*-ésimo sitio; p_j = efecto de la *j* – ésima procedencia; $\beta_k (Si)$ = es el efecto del *k*-ésimo bloque anidado dentro del *i*-ésimo sitio de prueba. $Si * p_j$ interacción entre sitio y procedencia.

También se realizó una regresión para observar los efectos de la distancia de transferencia altitudinal en cada una de las cinco variables de respuesta estudiadas: sobrevivencia, índice de estrés de planta, altura final e incremento de altura (Altura final- Altura inicial) de plántulas, diámetro basal y supervivencia en *A. religiosa*, con el siguiente modelo:

$$Y_{ij} = \beta_0 + X\beta_1X_1$$

β_0 = intercepto; β_1 = coeficiente de “X”; x = efecto de la distancia de transferencia altitudinal con respecto a las variables de respuesta (altura final, supervivencia, diámetro basal, índice de estrés).

RESULTADOS

Supervivencia

En la altitud más baja 3400 es decir la que se encuentra aún en el rango altitudinal de *A. religiosa* encontramos la mejor supervivencia, seguido por el sitio de 3800 y con supervivencias más bajas en 3600 y 4000 msnm (Figuras 7 y 8). Se encontraron diferencias significativas con respecto a los bloques anidados en sitio (Tabla 4).

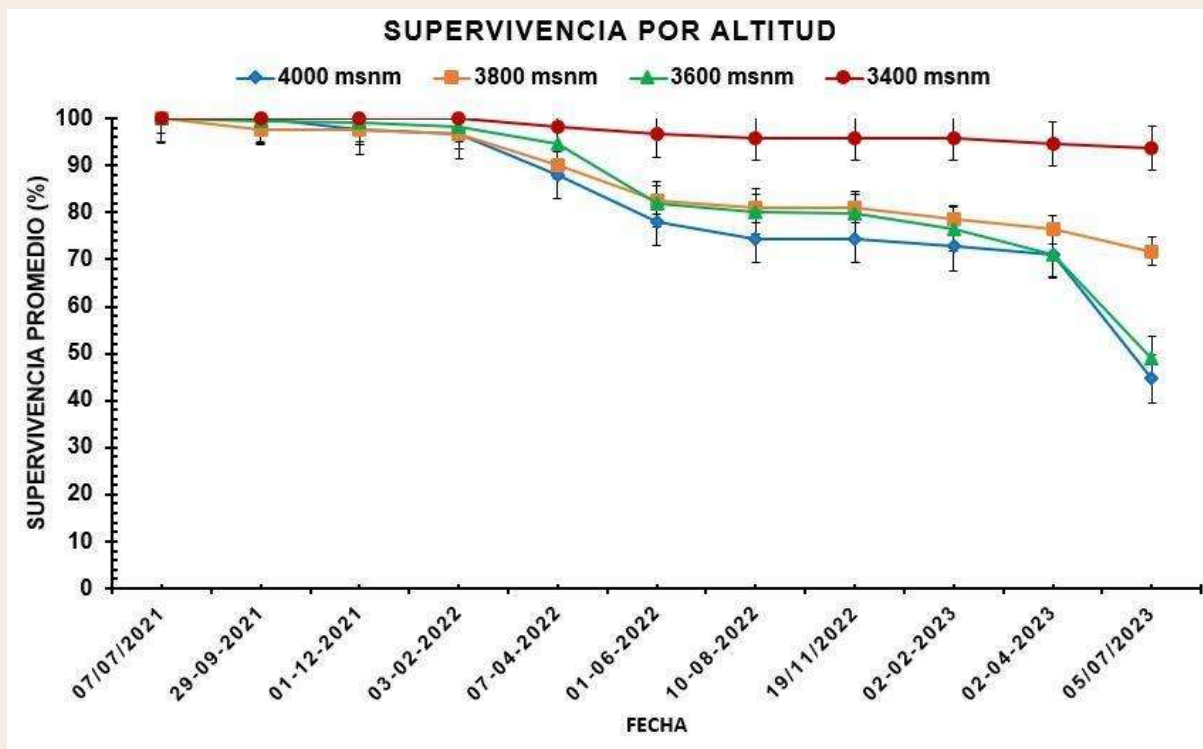


Fig 6. Curvas de supervivencia promedio después de dos años desde su establecimiento en campo dentro del APFFNT, en diferentes altitudes (4000, 3800, 3600 y 3400 msnm).

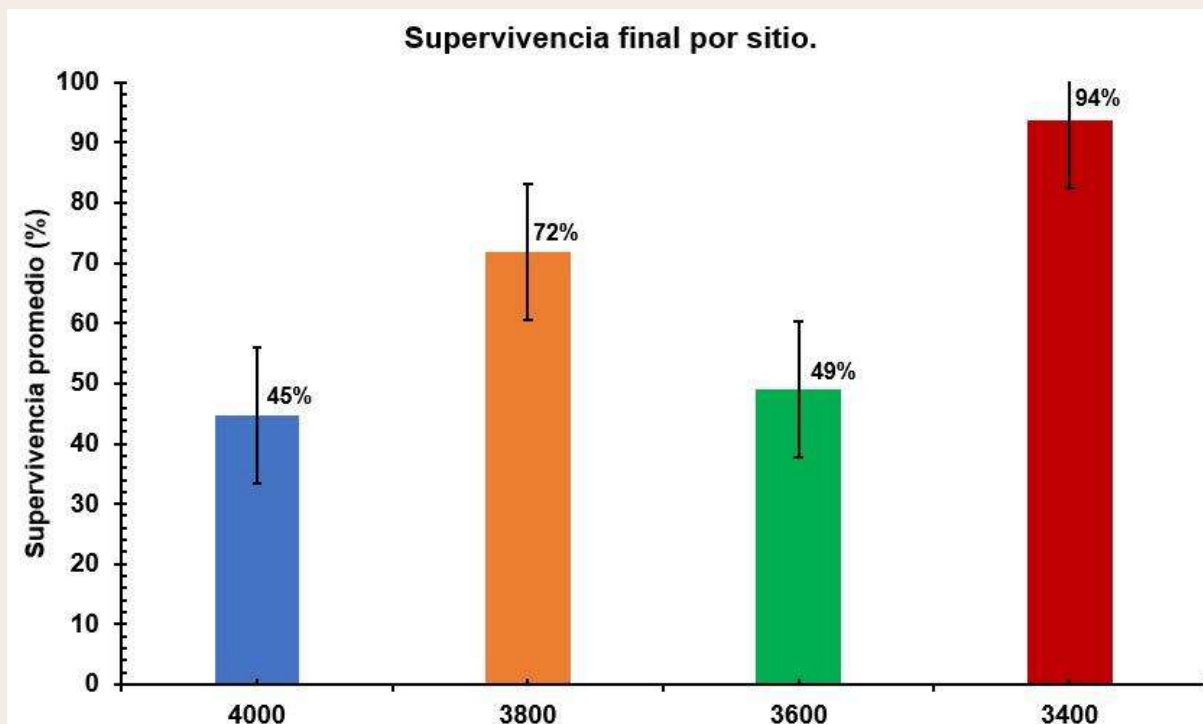


Figura 7. Supervivencia final promedio a dos años desde su establecimiento en campo dentro del APFFNT, en diferentes altitudes (4000, 3800, 3600 y 3400 msnm).

Tabla 4. Análisis de Varianza para la supervivencia final de *A. religiosa* comparando las diferentes procedencias en relación con los sitios de plantación.

Fuente de Variación	Parámetro	Error Estándar	Z	P
Procedencia	0	1	1	1
Sitio	1.84	1.6	1.15	0.12
Bloques (Sitio)	1.37	0.34	4.05	<.0001
Procedencia*Sitio	0	1	1	1
Intercepto	-0.93	0.69	-1.33	0.27

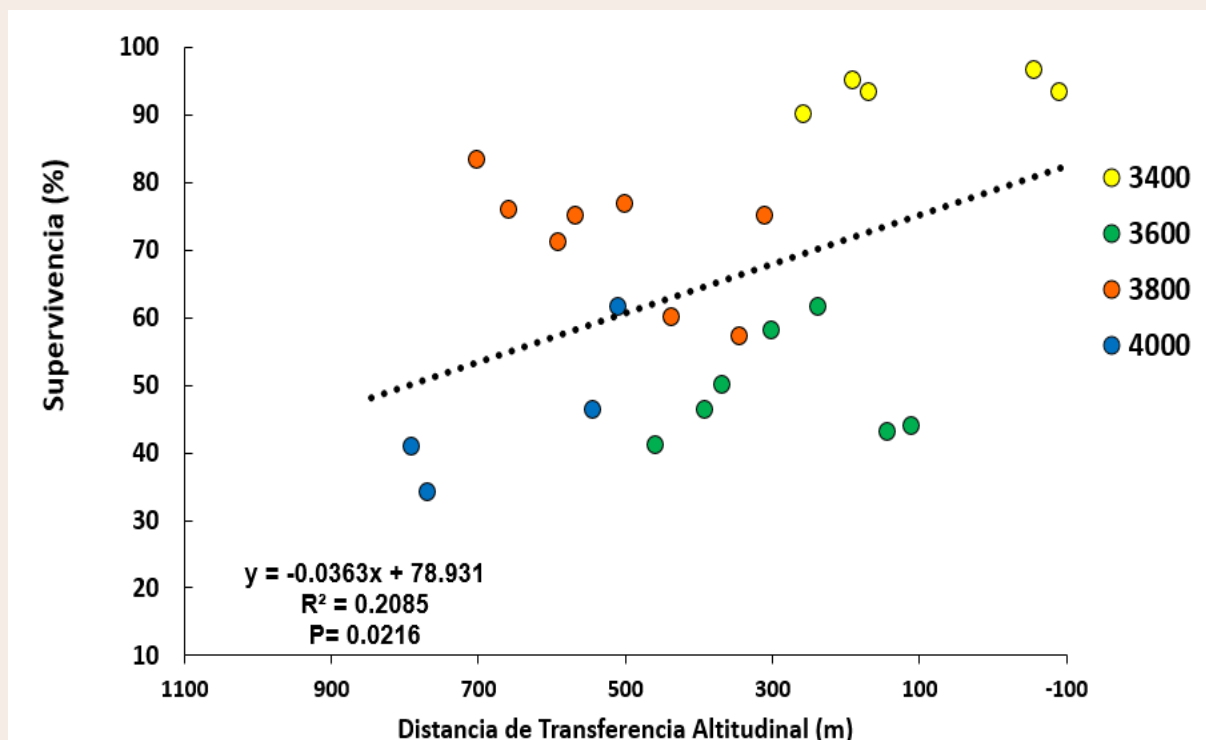


Fig 8. Distancia de Transferencia Altitudinal de procedencias de *Abies religiosa* en tanto a la supervivencia de planta en los diferentes gradientes altitudinales (4000, 3800, 3600 y 3400 msnm) en relación con las procedencias.

Incremento en altura de planta

Se encontró un patrón muy claro en el cual las plantas establecidas a menor altitud crecieron más que las que se encuentran a mayor altitud de manera muy clara (Figuras 9 y 10). Con respecto a los análisis de varianza se encontró que para la altura final de planta que la altitud sí representa diferencias al colocar la planta en sitios más altos (Tabla 5) y de igual manera para el incremento en altura (altura final – altura inicial) (Tabla 6).

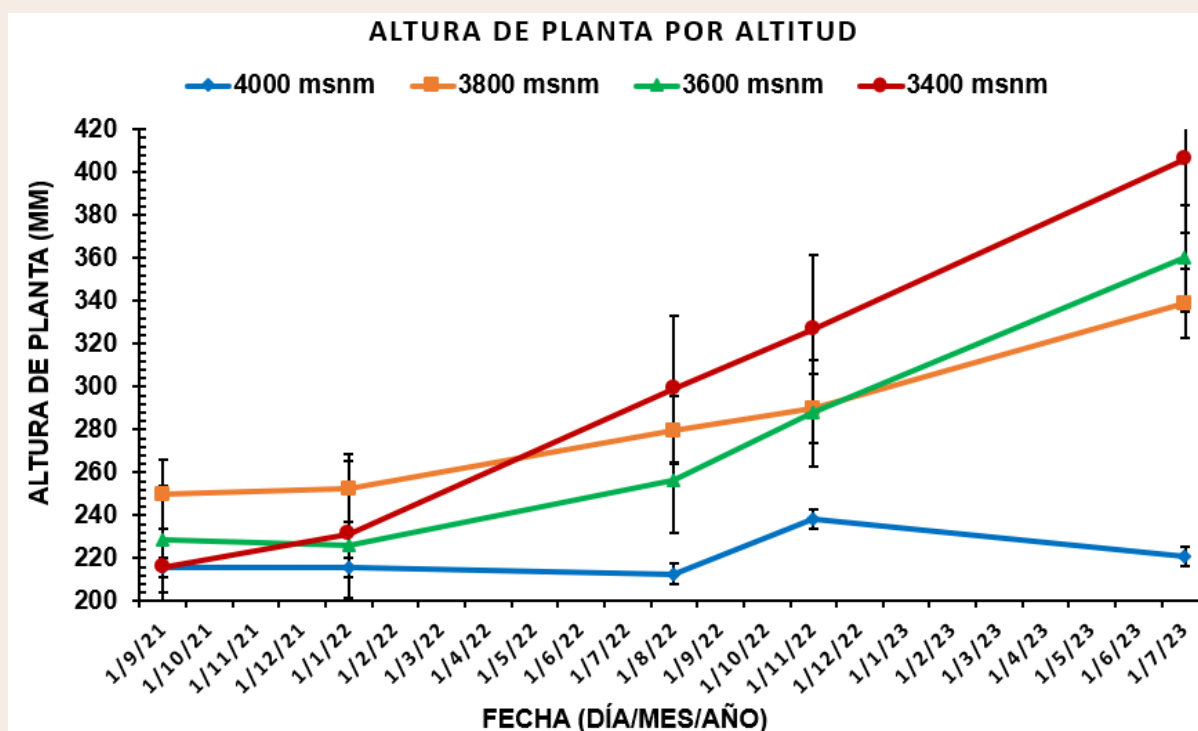


Fig 9. Curvas de altura de planta después de dos años desde su establecimiento en campo dentro del APFFNT, en diferentes altitudes (4000, 3800, 3600 y 3400 msnm).

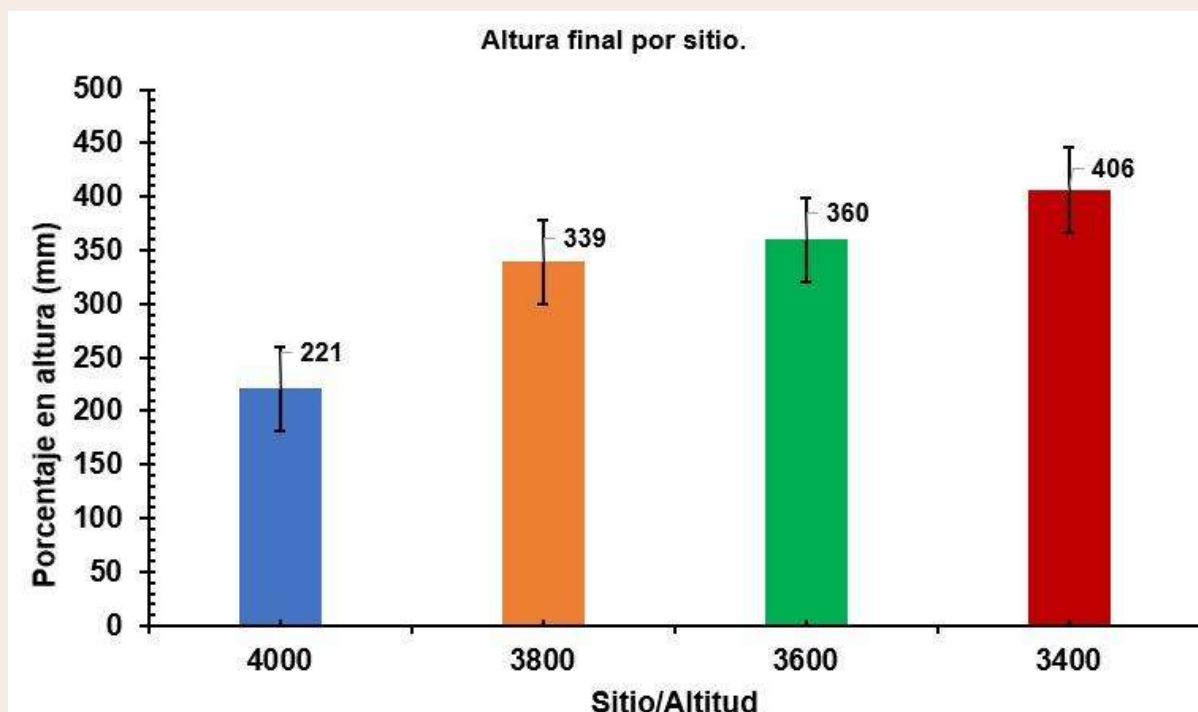


Figura 10. Altura de planta final a dos años desde su establecimiento en campo dentro del APFFNT, en diferentes altitudes (4000, 3800, 3600 y 3400 msnm).

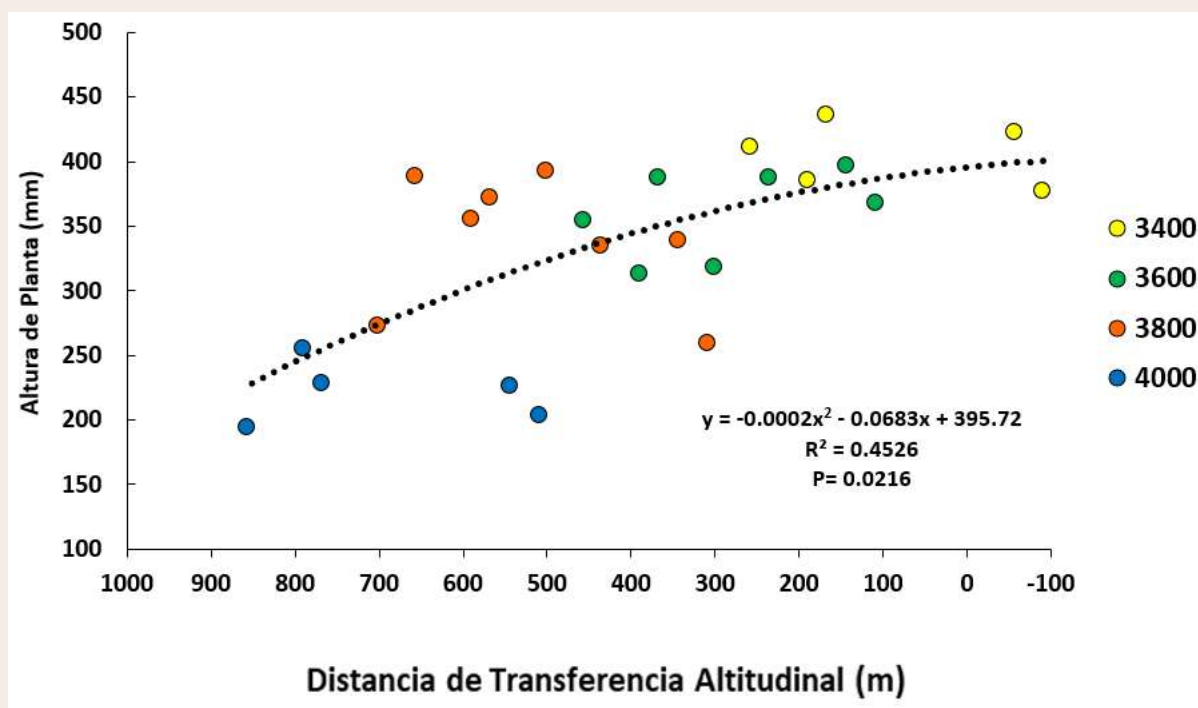


Fig 11. Efecto en la altura de planta de la Distancia de Transferencia Altitudinal de procedencias de *Abies religiosa* en los diferentes sitios de plantación (4000, 3800, 3600 y 3400 msnm) en relación a la altitud de origen de las procedencias.

Tabla 5. Análisis de Varianza para la altura final de *A. religiosa* comparando las diferentes procedencias en relación con los sitios de plantación.

Fuente de Variación	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	P
Procedencia	7	24122	1.56	0.20
Altitud del sitio	3	325775	16.14	<.0001
Bloques (Altitud)	94	16946	1.73	0.0002
Procedencia*Altitud	14	17428	1.78	0.0391
Error	403	9778.8		

Tabla 6. Incremento en altura para *A. religiosa* comparando las diferentes procedencias en relación con los sitios de plantación.

Fuente de Variación	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	P
Procedencia	7	7071.61	1.13	0.37
Altitud del sitio	3	366371	16.14	<.0001
Bloques (Altitud)	94	13721	2.17	<.0001
Procedencia*Altitud	14	17428	0.98	0.47
Error	403	6327		

Índice de Estrés

El estrés que reflejaban las plantas en tanto a su vigor expresado de manera física podemos observar que los resultados reflejaron una respuesta similar a la de la supervivencia, esto se debe a que las plantas entre más cercanas estén a un estrés, tienen una mayor mortalidad (Figura 12).

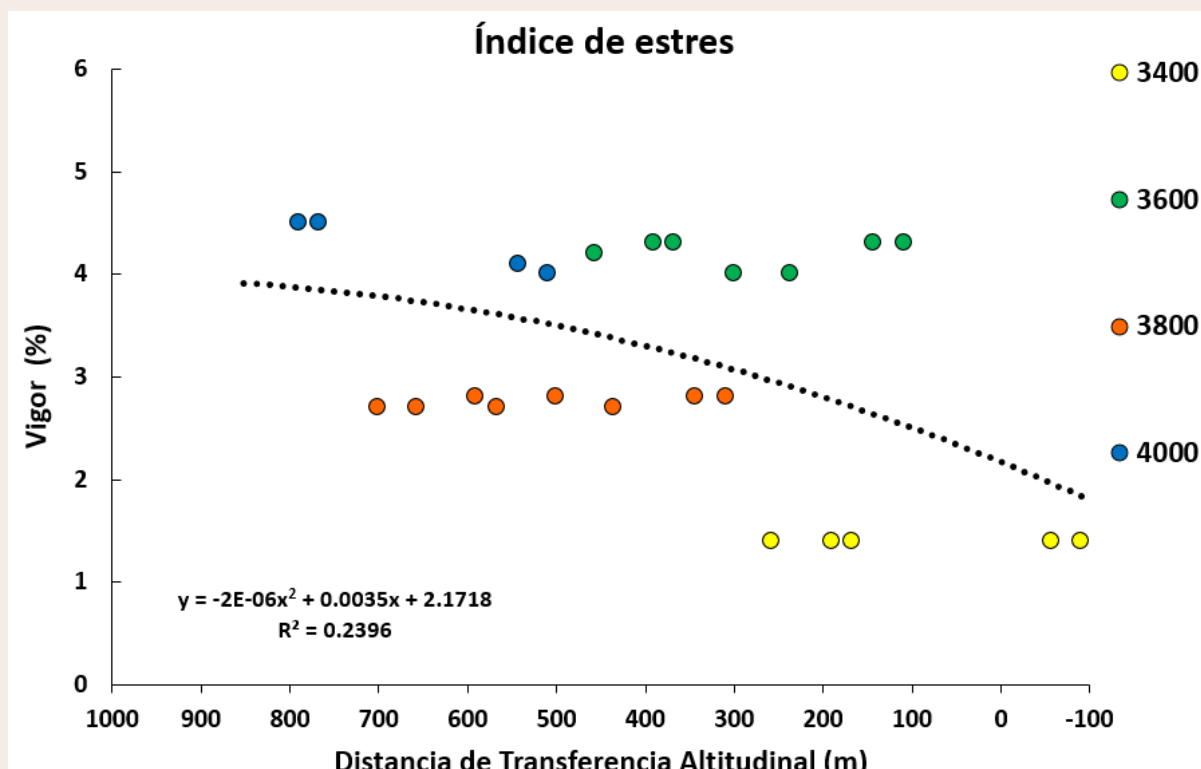


Fig 12. Distancia de Transferencia Altitudinal de procedencias de *Abies religiosa* en tanto al vigor de planta (1 = plantas sanas y vigorosas; 6 = plantas aparentemente muertas), en los diferentes gradientes altitudinales (4000, 3800, 3600 y 3400 msnm) en relación con las procedencias. Donde los valores más altos (+) de Distancia de Transferencia Climática, indican translocación a sitios más elevados que el origen de la semilla; y valores negativos, muestran la translocación a sitios de menor elevación.

Diámetro Basal

Al igual que en altura final e incremento en altura, el diámetro basal fue menor en los sitios más altos y mayor en los sitios de menor altitud (Figura 13). Siendo estas diferencias significativas solo para la altitud y los bloques anidados en sitio (Tabla 7).

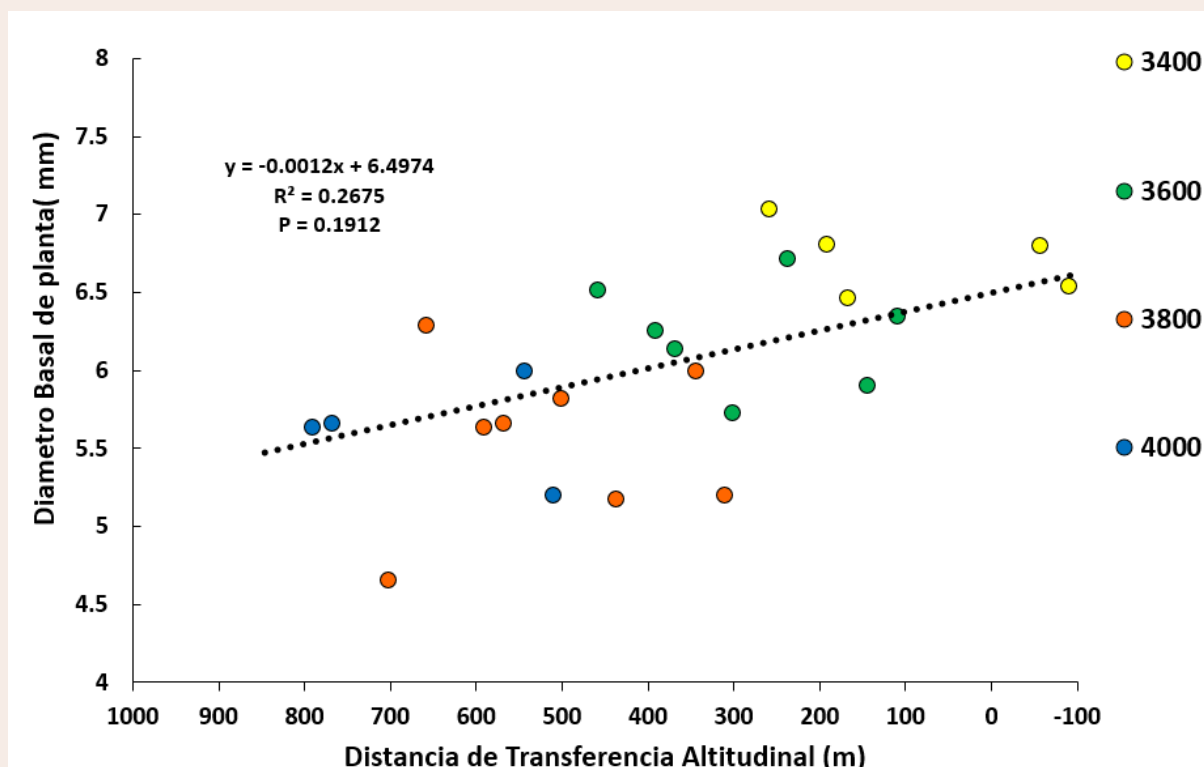


Fig 13. Diferencia del diámetro basal de *Abies religiosa* entre diciembre del 2021 y febrero del 2022.

Tabla 7. Análisis de Varianza para el incremento en el diámetro basal para *A. religiosa* comparando las diferentes procedencias en relación con los sitios de plantación.

Fuente de Variación	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	P
Procedencia	7	2.02	1.47	0.17
Altitud	3	47.80	34.81	<.0001
Bloques (Altitud)	98	4.95	3.61	<.0001
Procedencia*Altitud	14	1.45	1.06	0.39
Error	460	1.37		

Precipitación y Temperatura

De las mediciones de precipitación se obtuvieron los siguientes valores como se puede observar en las figuras 14, 15, 16 y 17 tablas 8 y 9.

Al comparar los datos de precipitación y la temperatura presentes (2021- 2023), se encontró que la precipitación no tiene variación relevante entre los sitios. Al compararse con el periodo de referencia (1961- 1990) se observó que durante las temporadas de lluvias, la precipitación es menor en los meses que deberían ser más lluviosos (junio, julio y agosto), pero en los sitios a altitudes más elevadas, 3800 y 4000, las lluvias son más fuertes en una temporada (agosto- septiembre), pero la estación de lluvias es más corta. Con respecto a la temperatura se encontró que la temporada de calor es mucho más cálida y la temporada invernal es más fría que antes.

Tabla 8. Temperaturas promedio mínima, media y máxima mensuales en cada altitud.

Altitud (msnm)	T° mínima mensual	T° media mensual	T° máxima mensual
3400	2.39 °C	8.00°C	16.84°C
3600	1.01°C	6.77°C	16.42°C
3800	0.30°C	6.30°C	17.47°C
4000	-0.25°C	5.38°C	15.80°C

Tabla 9. Precipitación promedio mensual por cada sitio de plantación.

Altitud (msnm)	Precipitación media mensual (mm)
3400	1016
3600	1016
3800	1015
4000	998

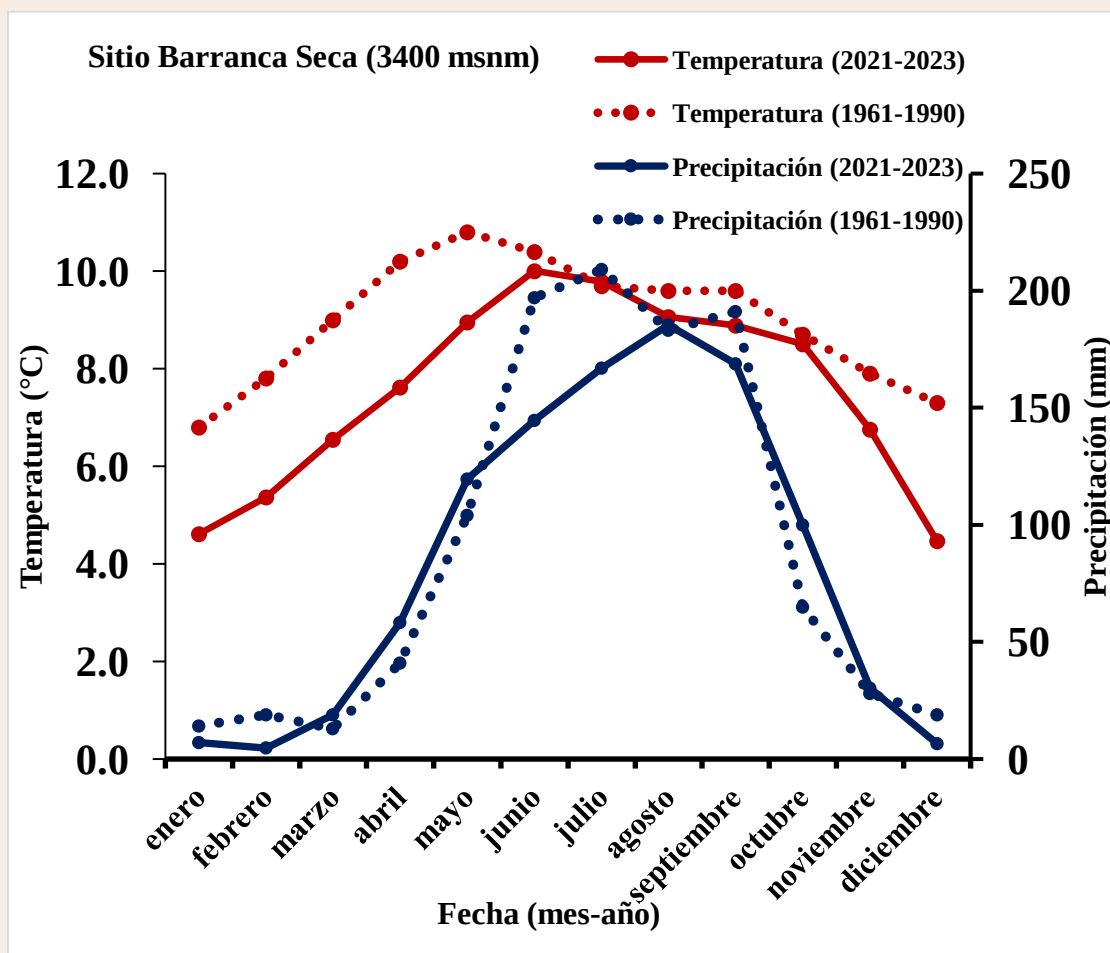


Fig 14. Relación mensual de Temperatura-Precipitación en el sitio de 3400 msnm (2021-2023), en relación con el periodo de referencia (1961-1990).

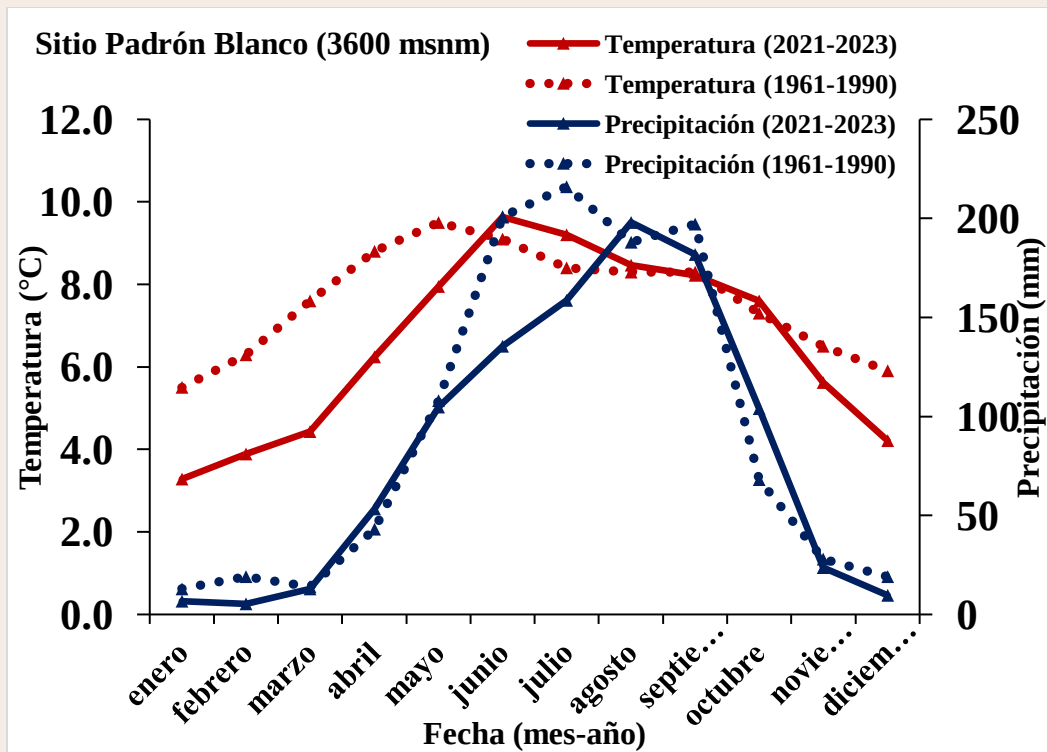


Fig 15. Relación Temperatura-Precipitación en la altura de 3600 msnm (2021-2023), en relación con el periodo de referencia (1961-1990).

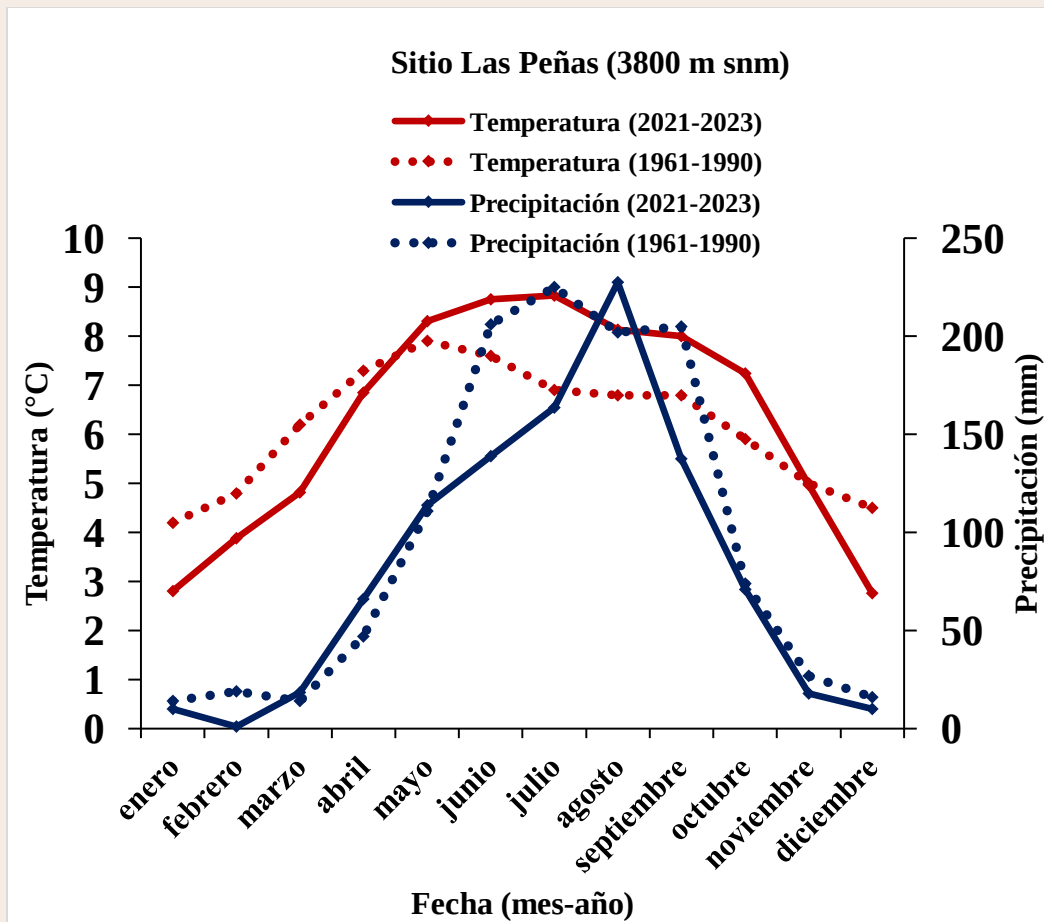


Fig 16. Relación Temperatura-Precipitación en la altura de 3800 msnm (2021-2023), en relación con el periodo de referencia (1961-1990).

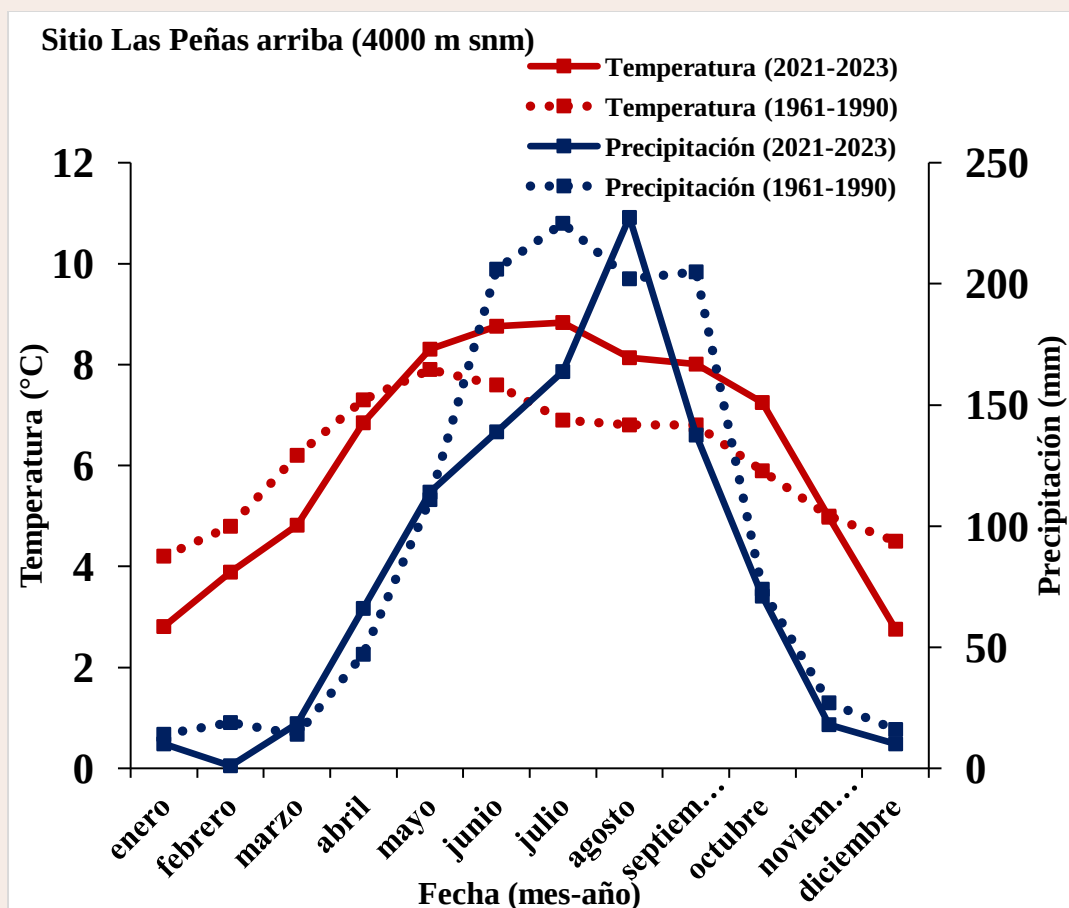


Fig 17. Relación Temperatura-Precipitación en la altura de 4000 msnm (2021-2023), en relación con el periodo de referencia (1961-1990).

DISCUSIÓN

En las últimas décadas algunas especies en el mundo están sufriendo un desacoplamiento a causas del cambio climático, incluidas entre ellas están las especies forestales como *Abies religiosa*. Estas especies con ciclos de vida largos tiene una gran desventaja ante el rápido cambio de los patrones climáticos que se están viviendo, es por ello que necesitan la ayuda del humano para ser trasladadas a sitios con las condiciones idóneas para su supervivencia en años futuros (Sáenz-Romero et al., 2012). La migración asistida de *Abies religiosa* es una alternativa para asegurar su perduración y a la vez es una alternativa para la creación de posibles sitios para la hibernación de la mariposa monarca. La desventaja de la distribución actual de la especie, es que se ha proyectado que para la década de 2060 se necesitaría moverse 300 y 500 m para realinear las poblaciones con el clima al que

están adaptadas (Gómez-Pineda et al., 2020). Y en la RBMM ya que su altitud máxima se encuentra a los 3640 msnm que va de la mano con el rango máximo de distribución del oyamel (CONANP, 2001). Por ello la idea de utilizar el APFF Nevado de Toluca (cumbre a 4680 msnm), ya que esta tendrá en el futuro condiciones parecidas a la de la RBMM, si bien en un rango altitudinal mayor. Tal movimiento altitudinal, de la RBMM al Nevado de Toluca, eventualmente permitirá compensar la temperatura que está prevista que se dará para la década del 2060.

Los resultados a dos años de su plantación en campo (julio 2021- julio 2023) indican que las plantas siguen una tendencia con respecto a la altitud en las cuales se plantaron. Esto quiere decir que hay un efecto de la altitud sobre las variables de respuesta como lo son la altura final e incremento en altura, supervivencia, índice de estrés y diámetro basal de los individuos. Reflejando que a menor altitud *A. religiosa* sobrevive y crece más que a mayores altitudes, a excepción de la supervivencia en el sitio colocado a 3600 msnm donde la supervivencia final fue menor que en el sitio a 3800 msnm. Esto último podría deberse a plantas de *A. religiosa* en el sitio de 3600 m que pudieron haber sido atacadas por tuza, no muertas por estrés inducido por el clima del sitio y/o debilitadas por el decaimiento de algunos arbustos utilizados como nodrizas.

En las variables de respuesta, se pudo observar que generalmente las plantas sin importar su procedencia sobrevivieron, crecieron y tenían un mejor vigor en altitudes más bajas con respecto a los sitios más altos. Respuesta totalmente esperada, ya que nuestras altitudes más bajas fueron 3400 y 3600 msnm, que pertenecen al rango de distribución natural de *A. religiosa*, si bien en su extremo altitudinal superior.

Conclusión

Las procedencias obtuvieron una respuesta muy clara en tanto a la altitud donde se plantaron, sobreviviendo y creciendo en general de mejor manera en los sitios más bajos del gradiente (3400 msnm) que en los de mayor altitud (4000 msnm). Destacando que aún no reflejan sus diferencias (estadísticamente significativas) entre procedencias para ninguna de las fuentes de variación (crecimiento, supervivencia y estrés), por lo cual se recomendaría seguir por más tiempo con la evaluación y

esperar a que la diferencia entre procedencias en las plántulas de oyamel se vea afectadas por el cambio en su elevación altitudinal y con la recomendación de utilizar nuevas plantas nodrizas como lo es *Baccharis conferta*, especie que ya ha sido puesta a prueba en otras ocasiones para nodrizar al oyamel durante sus primeras etapas de vida.

Lo antes mencionado con la intención observar si es factible llevar a cabo una migración altitudinal asistida por encima de la distribución natural máxima de *A. religiosa* (aproximadamente 3600 msnm), traslocando las fuentes de semillas hasta 400 m más arriba (a partir de su origen), bajo la protección de sombra de arbustos locales. Nuestros resultados indican que es factible tal movimiento altitudinal. En particular, la migración fue sumamente exitosa en el a 3800 msnm, con una supervivencia del 79% y una altura final de planta de 33.9 cm a dos años de su establecimiento (2021 a 2023).

Bibliografía

- Alfaro R., Fady B., Vendramin G., Dawson I., Fleming R., Sáenz-Romero C., Lindig-Cisneros R., Murdock T., Vinceti B. & Navarro C. 2014. The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change. *For. Ecol. Manag.* 333: 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.006>
- Candeau-Dufat R. & Franco-Maass S. 2007. Dinámica y condiciones de vida de la población del Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) en la generación de presión a los ecosistemas circundantes y de impactos ambientales a través de un sistema de información geográfica. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.* 62: 44-68
- Carbajal-Navarro A. L., Navarro-Miranda E., Blanco-García A., Cruzado-Vargas A. L., Gómez-Pineda E., Zamora-Sánchez C., Pineda-García F., O'Neill G., Gómez-Romero M., Lindig-Cisneros R., Johnsen K. H., Lobit P., Lopez-Toledo L.,Herrerías-Diego Y. and Sáenz-Romero C. (2019). Ecological restoration of *Abies religiosa* forests using nurse plants and assisted migration in the Monarch

Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. Front. Ecol. Evol. 7:421.
doi:10.3389/fevo.2019.00421

CEPANAF. 2023. Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna. 06 de septiembre de 2023

CONANP. 2016. Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Comisión Nacional Forestal. México. 7-8 p

Cruzado-Vargas, A. L., Blanco-García, A., Lindig-Cisneros, R., Gómez-Romero, M., López-Toledo, L., de la Barrera, E., Sáenz-Romero, C. (2021). Reciprocal common garden altitudinal transplants reveal potential negative impacts of climate change on *Abies religiosa* populations in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve overwintering sites. Forests 12(69).
<https://doi.org/10.3390/f12010069>

Flores A. (2019). Producción maderable de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en zonas de movimiento de germoplasma. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 10 (56): 238- 247

Gómez-Pineda, E.; Sáenz-Romero, C.; Ortega-Rodríguez, J.M.; Blanco-García, A.; Madrigal-Sánchez, X.; Lindig-Cisneros, R.; López-Toledo, L.; Pedraza-Santos, M.E.; Rehfeldt, G.E. Suitable climatic habitat changes for Mexican conifers along altitudinal gradients under climatic change scenarios. Ecol. Appl. 2020, 30. <https://doi.org/10.1002/eap.2041>

Martínez-Arévalo J. (2015). Características in situ y de propagación de seis especies arbustivas utilizadas como plantas nodrizas en la región occidental de Guatemala. Ciencia, Tecnología y Salud. 2 (2). 105-117. DOI: 10.36829/63CTS.v2i2.50

Rehfeldt GE (1983 a) Seed transfer guidelines for Douglas-fir in Western Montana. Research Note INT-329. United States Department of Agriculture. Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. Ogden, UT 84401. 4 pp.

- Sáenz-Romero, C.; Rehfeldt, G.E.; Duval, P.; Lindig-Cisneros, R.A. 2012. *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. For. Ecol. Manag. 275: 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.004>
- Toscana-Aparicio A. & Granados Ramírez R. 2015. Diversas experiencias organizativas desde la sociedad civil en defensa de la vida, el territorio y el patrimonio Recategorización del Parque Nacional Nevado de Toluca. Política y Cultura. 44: 79-105
- Vallejos J., Badilla Y., Picado F. & Murillo O. 2010. Metodología Para La Selección E Incorporación De Árboles Plus En Programas De Mejoramiento Genético Forestal. Agronomía Costarricense 34(1): 105-119
- Villers Ruíz Lourdes & López Blanco Jorge. 1995. Evaluación del uso agrícola y forestal del suelo en la cuenca del río Temascaltepec, Nevado de Toluca, México. Investigaciones Geográficas Boletín. 31: 69-92

CONCLUSIÓN GENERAL

Ante las problemáticas ambientales que sufren los bosques en la actualidad se necesitan nuevas estrategias de restauración que desplacen a las antiguas y que actualmente se siguen usando en nuestros bosques mexicanos por parte de las dependencias gubernamentales. No cabe duda que para esto es indispensable generar nueva investigación e información que oriente un poco estas nuevas perspectivas de restauración, considerando los efectos del cambio climático. Para enfrentar los desafíos para la conservación de la biodiversidad de las especies forestales como lo es *A. religiosa*, debido al cambio climático, y otras problemáticas que desencadenan la pérdida de su cobertura forestal. Es por ello que la migración asistida es una excelente herramienta en la adecuación de las poblaciones con el clima para el cual están adaptadas, buscando que sobrevivan y se adapten de una mejor manera al entorno cambiante. De la mano con el uso de plantas nodrizas como un medio facilitador para las primeras etapas de vida del oyamel, protegiéndonos de diferentes factores, como las temperaturas altas extremas, heladas, vientos y plagas.

Observamos buenos resultados en ambos experimentos, ya que en Sierra Chincua con el dosel de nodrizas obtuvimos casi el 50% de sobrevivencia en ambas especies de arbustos, en la zona núcleo de la Reserva y siendo uno de los puntos más altos de esta misma, en un sitio perturbado por los incidentes ocurridos en 2015 y 2016 (explicados en la parte introductoria). Con las alturas obtenidas durante el transcurso 28 meses del experimento, se realizó una regresión exponencial la cual nos reflejó que serían necesarios de 4.5 a 5 años para que ambas especies puedan alcanzar un metro de altura y poder plantar bajo su sombra las plántulas de *A. religiosa*.

En tanto a la plantación dentro del Nevado de Toluca se encontró que es viable subir al oyamel de 200 a 400 msnm sobre el sitio de origen de la semilla. Cabe resaltar que fue de gran ayuda el uso de las plantas nodrizas que se encontraban en los sitios de plantación. Es por ello que se recomienda que estos experimentos pueden llevarse simultáneamente (el establecimiento de nodrizas y la migración de procedencias de *A. religiosa*). Es decir, se sugiere establecer varios años previos a la plantación del oyamel el dosel arbustivo de nodrizas, y mientras estos incrementan su tamaño en el sitio a reforestar, producir las plántulas de oyamel en vivero y a los 4 o 5 años de la plantación de las nodrizas establecer las plántulas de oyamel.

Gracias a los resultados dentro del APFFNT se tiene la esperanza de mantener e incrementar los sitios de hibernación de la mariposa monarca bajo el clima futuro proyectado para la década de 2060, tratando de compensar 2.3 °C de aumento de la temperatura media anual.

También se recomendaría seguir monitoreando ambos experimentos, debido que aún las procedencias de oyamel no reflejaron diferencias significativas entre ellas. Y en tanto a las nodrizas ver si se podrían plantar arbustos de mayor tamaño y así poder alcanzar el metro de altura en un tiempo más corto y reducir costos.

Se podría implementar el uso de plantas nodrizas de tallas más grandes con respecto a las que se usaron en nuestro primer experimento (4 a 6 cm), ya que ha sido un proceso muy tardado para los arbustos que se plantan para servir posteriormente como nodrizas.

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Blanco-García A., Sáenz-Romero C., Martorell C., Alvarado-Sosa P., & Lindig-Cisneros R. A. (2011). Nurse plant and mulching effects on tree conifer species in a Mexican temperate forest. *Ecological Engineering*. 37: 994–998. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2011.01.012
- Brower, L. P., Williams, E. H., Jaramillo-López, P., Kust, D. R., Slayback, D. A., y Ramírez, M. I. 2017. Butterfly mortality and salvage logging from the March 2016 storm in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Mexico. *American Entomology*. 63: 151–164. doi: 10.1093/ae/tmx052
- Carbajal-Navarro A., Blanco-Gracia A., Navarro-Miranda E., Cruzado-Vargas A., Gómez-Pineda E., Zamora-Sánchez C., Pineda-García F., O'Neill-Greg, Gómez-Romero M., Lindig-Cisneros R., Johnsen K. H., Lobit P., Lopez-Toledo L., Herrerías-Diego Y., & Sáenz-Romero C. (2019). Assisted migration in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 7:421. DOI: 10.3389/fevo.2019.00421

CONANP. (2016). Informe Unesco RB Mariposa Monarca 2016. (09 de diciembre de 2023).

<https://i-efectividad.conanp.gob.mx/i-efectividad/CyEN/RB%20Mariposa%20Monarca/Atributos/INFORME%20UNESCO%20RB%20MARIPOSA%20MONARCA%202016.pdf>

Cruzado-Vargas, A.L., Blanco-García, A., Lindig-Cisneros, R., Gómez-Romero, M., Lopez-Toledo, L., de la Barrera, E. & Sáenz-Romero, C. (2021). Reciprocal Common Garden Altitudinal Transplants Reveal Potential Negative Impacts of Climate Change on *Abies religiosa* Populations in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve Overwintering Sites. *Forests*, 12(69): 12-19. <https://doi.org/10.3390/f12010069>

Díaz Cordero G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*. 37(2): 227-240

Encina-Domínguez J., Encina-Domínguez F., Mata-Rocha E. & Valdes-Reyna J. (2008). Aspectos estructurales, composición florística y caracterización ecológica del bosque de oyamel de la sierra de Zapalinamé, Coahuila, México *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 83: 13-24. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57711109003>

Gallardo-Salazar J., Rodríguez-Trejo D., Castro-Zavala S. 2019. Calidad De Planta Y Supervivencia De Una Plantación De Oyamel [*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.] De Dos Procedencias En México Central. *Agrociencia*. 53: 631-643

Martínez-Arévalo J. (2015). Características in situ y de propagación de seis especies arbustivas utilizadas como plantas nodrizas en la región occidental de Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*. 2 (2). 105-117. DOI: 10.36829/63CTS.v2i2.50

Martínez-Arévalo J. (2016). Los bosques de *Abies guatemalensis* Rehder de San Marcos, Guatemala: una oportunidad para su restauración ecológica. *Ciencia, Tecnología y Salud*. 3(1): 27-46. <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/cytes/article/view/265/157>

Martínez-Arévalo J. (2018). Modelo de negocio de restauración productiva de *Abies guatemalensis* Rehder utilizando plantas nodrizas para su establecimiento.

Ciencia, Tecnología Y Salud. 5(2): 182–188.
<https://revistas.usac.edu.gt/index.php/cytes/article/view/491/412>

Navarro-Cano J.A., Goberna, M. & Verdú M. (2019). La facilitación entre plantas como herramienta de restauración de diversidad y funciones ecosistémicas. *Ecosistemas*. 28(2): 20-31. DOI:10.7818/ECOS.1747

Pérez Cruz L. Establecimiento de *Baccharis conferta* como planta nodriza para futuras reforestaciones de *Abies religiosa* en la zona núcleo de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. 2022. Tesis de licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás De Hidalgo (Facultad de Biología). Morelia Mich. México.

Pérez-Miranda R., Romero-Sánchez M.E., González-Hernández, A., Pérez-Sosa E. & Flores-Ayala E. (2018). Distribución del *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. bajo escenarios de cambio climático en el eje neovolcánico, México. *Agro productividad*. 10(8): 29-34. <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1071>

Ramírez-Contreras & Rodríguez-Trejo. (2009). Plantas Nodriza En La Reforestación Con *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 43-48.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v15n1/v15n1a5.pdf>

Rzedowski G.C de Rzedowski y colaboradores. (2001). Flora fanerogámica del Valle de México. 2a. ed., Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro, Michoacán. 2: 46-47.
https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/Flora_del_Valle_de_Mx1.pdf

Rzedowski, J., (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México 162-166.
https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf

- Saavedra-Romero L., Alvarado-Rosales D., Vargas-Hernández J., Hernández-Tejeda T. (2003). Análisis de la precipitación pluvial en bosques de *Abies religiosa* (HBK.) Schltdl. et Cham., en el sur de la ciudad de México. *Agrociencia*. 37(1): 57-64. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30237106>
- Saéñz Romero C., Rehfeldt N. L., Crookston P., Duval R., St-Amant J., Beaulieu B. & Richardson. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*. 102: 595-623. DOI:10.1007/s10584-009-9753-5
- Sáenz-Romero C, Rehfeldt GE, Duval P, Lindig-Cisneros R. 2012. *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management* 275:98-106. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.004>
- Sánchez-Velásquez L., Domínguez-Hernández D., Pineda-López M. & Lara-González R. (2011). Does *Baccharis conferta* shrub act as a nurse plant to the *Abies religiosa* seedling?. *The Open Forest Science Journal*. 4(1): 67-70. DOI: 10.2174/1874398601104010067
- SAS Institute. 2014. SAS/STAT (Version 9.4) Computer Software; SAS Institute Inc.: Cary, NC, USA.

NOMBRE DEL TRABAJO

Uso de plantas nodrizas para Abies religiosa en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca y el Neva

AUTOR

Legna Anaid Pérez Cruz

RECuento DE PALABRAS

20758 Words

RECuento DE CARACTERES

110801 Characters

RECuento DE PÁGINAS

94 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

3.3MB

FECHA DE ENTREGA

Aug 15, 2024 11:15 AM GMT-6

FECHA DEL INFORME

Aug 15, 2024 11:16 AM GMT-6

● 29% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 28% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de trabajos entregados
- 21% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en ecología Integrativa	
Título del trabajo	Uso de plantas nodrizas para <i>Abies religiosa</i> en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca y el Nevado de Toluca.	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Legna Anaid Pérez Cruz	perezlegna16@gmail.com
Director	Cuauhtemoc Saenz Romero	Cuauhtemoc.saenz@umich.mx
Codirector	Jose Arnulfo Blanco Garcia	arnulfo.blanco@umich.mx
Coordinador del programa	Alberto Gómez-Tagle Chávez	mae.cs.ecologia.integrativa@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción

Asistencia en la redacción	No	NA
----------------------------	----	----

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	NA
Traducción a otra lengua	No	NA
Revisión y corrección de estilo	No	NA
Análisis de datos	No	NA
Búsqueda y organización de información	No	NA
Formateo de las referencias bibliográficas	No	NA
Generación de contenido multimedia	No	NA
Otro	NA	NA

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Legna Anaid Pérez Cruz 
Lugar y fecha	Morelia Michoacán, 15 de agosto del 2024.