

Seed transfer zones for reforestation in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve and the Meseta Purépecha facing climate change

Zonas de transferencia de semillas para la reforestación en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca y la Meseta Purépecha ante el cambio climático

Gyorgy E. Manzanilla-Quijada¹; Verónica Osuna-Vallejo^{1,2};
Ana Gabriela Zacarías-Correa¹; Erika Gómez-Pineda^{1,3};
José L. Gallardo-Salazar¹; Cuauhtémoc Sáenz-Romero^{1,4*}

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales. Av. San Juanito Itzicuaró s/n, col. Nueva Esperanza. C. P. 58330. Morelia, Michoacán, México.

²Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT). Investigadoras e Investigadores por México.

³Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701. C. P. 58190. Morelia, Michoacán, México.

⁴Laboratorio Nacional CONAHCYT de Biología del Cambio Climático (LNCBioCC), México.

*Corresponding author: csaenzromero@gmail.com; tel.: +52 443 334 0475 ext. 118.

Abstract

Introduction. Reforestation and restoration of forest ecosystems are increasingly difficult with climate change.

Objective. Define seed transfer zones for reforestation in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve and the 'Sembrando Vida' program in the Meseta Purépecha to mitigate climate change.

Materials and methods. Maps were generated to visualize where the ideal climate conditions for reforestation are projected to occur (RCP 4.5 scenario, 2050) at different sites using seedlings collected in delimited areas under a reference climate (1961-1990). A climate zone system was used (based on the temperature of the coldest month and an aridity index) and layers of suitable climatic habitat for *Pinus pseudostrubus* and *Abies religiosa* for the reference (1961-1990) and projected (2060 decade) period.

Results and discussion. The areas to be reforested will be warmer in the future, requiring seed from sites, on average, 3 °C warmer. A reduction of approximately 50 % of the area of climatically favorable habitat for *P. pseudostrubus* and *A. religiosa* was estimated. This reduction occurs at the lower altitudinal limit called the 'xeric limit'; therefore, it will be necessary to replace them with species adapted to warmer sites.

Conclusions. Moving seed sources from warmer (+3 °C) and drier sites to currently wetter and cooler planting sites is recommended. This provides a useful tool for deciding the seed source under adaptive forest management facing climate change.

Keywords: *Abies religiosa*; climatypes; climate habitat; *Pinus pseudostrubus*; 'Sembrando Vida' program.

Resumen

Introducción. La reforestación y restauración de los ecosistemas forestales son cada vez más difíciles en el contexto del cambio climático.

Objetivos. Definir zonas de transferencia de semillas para reforestación en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca y el programa 'Sembrando Vida' en la Meseta Purépecha, para compensar el cambio climático.

Materiales y métodos. Se generaron mapas para visualizar dónde se predicen las condiciones climáticas idóneas para la reforestación con plántulas de semilla colectada en zonas delimitadas bajo un clima de referencia (1961-1990) que se proyecta ocurrirá (escenario RCP 4.5, 2050) en sitios distintos. Se utilizó una zonificación climática (basada en la temperatura del mes más frío e índice de aridez) y capas de hábitat climático propicio para *Pinus pseudostrubus* y *Abies religiosa* del periodo de referencia (1961-1990) y proyectado (década 2060).

Resultados y discusión. Las áreas por reforestar serán más cálidas en el futuro, por lo que se requiere semilla de sitios, en promedio, 3 °C más cálidos. Se estimó una reducción de aproximadamente 50 % de la superficie del hábitat climático propicio de *P. pseudostrubus* y *A. religiosa*. Tal reducción ocurre en el límite inferior altitudinal denominado 'límite xérico', por lo que será necesario el reemplazo de estas por especies adaptadas a sitios más cálidos.

Conclusiones. Se recomienda el traslado de las fuentes de semillas de lugares más cálidos (+3 °C) y secos a sitios de plantación actualmente más húmedos y fríos. Este enfoque proporciona una herramienta útil para decidir la fuente de semilla bajo un manejo forestal adaptativo ante el cambio climático.

Palabras clave: *Abies religiosa*; climatipo; hábitat climático; *Pinus pseudostrubus*; Sembrando Vida.

Introduction

The composition of forest ecosystems and genetic resources are affected by processes that threaten their conservation, such as overexploitation, land use conversion, pollution, forest fires, and especially climate change (Soni & Ansari, 2017). This leads to alterations in the distribution, structure, and abundance of tree species in forests, resulting in the reduction of locally adapted population sizes or their disappearance (Urban, 2015).

Global projections in the context of climate change suggest increases in average annual temperatures, droughts, and changes in precipitation patterns (Hammond et al., 2022; Sáenz-Romero et al., 2010). For Mexico, a 9 % reduction in average precipitation is estimated by the year 2060 (Sáenz-Romero et al., 2010). Some species in forest ecosystems are threatened by the effects of climate change, especially in humid environments, where changes towards aridity are predicted (Castellanos-Acuña et al., 2018; Sáenz-Romero et al., 2010, 2016). The evolution of climate will increase probability, frequency, and intensity of extreme weather phenomena such as heatwaves, cold spells, floods, and droughts (Hansen et al., 2012; Walsh et al., 2013). Therefore, in forests, several species and tree populations may not adapt quickly enough to the new climate conditions due to limitations in their ability to migrate through natural means and in their phenotypic plasticity (Gray & Hamann, 2013; Sáenz-Romero et al., 2016). This will be more drastic for species in geographically confined ecosystems, particularly in mountains, where several species would tend to shift their distribution towards other latitudes and altitudes (Gutiérrez & Trejo, 2014). This is especially true for tree populations located at the xeric limits of species found at the lower altitudinal or southern boundary (in the northern hemisphere) of their natural distribution (Mátyás, 2010). Therefore, climate change poses significant challenges for forest managers (Sáenz-Romero et al., 2016).

Reforestation and restoration programs are the most common actions for the recovery of vegetation cover (Castro et al., 2021). In Mexico, data from reforestation programs during the period 2004-2016 indicate that the annual survival rate per state for different ecosystems was recorded between 30 and 53 %, with an overall average of 43 % (Prieto et al., 2018). This poor survival and growth of the plants used has often been attributed to the use of germplasm from unsuitable provenances (Crow et al., 2018; O'Neill et al., 2014; Tomita et al., 2017). In the last two decades, Mexico has implemented reforestation and restoration programs such as the Programa Nacional de Reforestación, Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales and the current program actual 'Sembrando Vida',

Introducción

La composición de los ecosistemas forestales y sus recursos genéticos se ven afectados por procesos que amenazan su conservación, como son la sobrexplotación, la conversión de uso del suelo, la contaminación, los incendios forestales y sobre todo el cambio climático (Soni & Ansari, 2017). Esto provoca alteraciones en la distribución, estructura y abundancia de las especies arbóreas en los bosques, lo que conduce a la reducción del tamaño de las poblaciones localmente adaptadas o a su desaparición (Urban, 2015).

Las proyecciones globales en un contexto de cambio climático sugieren incrementos en las temperaturas medias anuales, sequías y cambios en los eventos de precipitación (Hammond et al., 2022; Sáenz-Romero et al., 2010). Para México, se estima una reducción media del 9 % de las precipitaciones para el año 2060 (Sáenz-Romero et al., 2010). Algunas especies de ecosistemas forestales están amenazadas por los efectos del cambio climático, especialmente en los ambientes húmedos, donde se prevén cambios hacia la aridez (Castellanos-Acuña et al., 2018; Sáenz-Romero et al., 2010, 2016). La evolución del clima aumentará la probabilidad, frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos como olas de calor, olas de frío, inundaciones y sequías (Hansen et al., 2012; Walsh et al., 2013). Como consecuencia, en los bosques, varias especies y poblaciones de árboles podrían no adaptarse con rapidez suficiente a las nuevas condiciones climáticas, debido a limitaciones en su capacidad de migración por medios naturales y en su plasticidad fenotípica (Gray & Hamann 2013; Sáenz-Romero et al., 2016). Esto será más drástico para las especies de ecosistemas geográficamente confinados, en particular las montañas, de modo que varias tenderían a desplazar su distribución hacia otras latitudes y altitudes (Gutiérrez & Trejo, 2014). Esto es especialmente cierto para las poblaciones arbóreas situadas en los límites xéricos de las especies que se ubican en el límite altitudinal inferior o sur (en el hemisferio norte) de su distribución natural (Mátyás, 2010). Por ello, el cambio climático representa retos importantes para los manejadores de los bosques (Sáenz-Romero et al., 2016).

Los programas de reforestación y restauración son las acciones más comunes para la recuperación de la cobertura vegetal (Castro et al., 2021). En México, los datos de los programas de reforestación durante el periodo 2004-2016 indican que la tasa de supervivencia anual por estado para diferentes ecosistemas se registró entre 30 y 53 %, con un promedio general de 43 % (Prieto et al., 2018). Esta escasa supervivencia y crecimiento de las plantas utilizadas se ha atribuido con frecuencia al uso del germoplasma de procedencias inadecuadas (Crow et al., 2018; O'Neill et al., 2014; Tomita et al., 2017).

which have increased the demand for germplasm. That program is one of the largest reforestation efforts of the federal government (2018-2024) with a large investment aimed at reducing social inequality and restoring forest and agroforestry cover in degraded sites, which could provide economic income and environmental services (water sequestration, carbon and biodiversity preservation) in the future. The program 'Sembrando Vida', operated by the Welfare Secretariat of Mexico and not by the National Forestry Commission of Mexico, has not considered important technical aspects that could improve the survival and growth of reforestation and restoration efforts, and seems to ignore the expected impacts of climate change (Gallardo-Salazar et al., 2023). The latter are of greater importance in the planning of reforestation, as they are and will become progressively more severe (Astudillo-Sánchez et al., 2017; Ipinza & Gutiérrez, 2014; Sáenz-Romero et al., 2020).

The insufficient compliance with regulations for germplasm management, which guarantees seed supply and improves survival rates, are the main challenges faced by institutions and organizations dedicated to reforestation and restoration (CONAFOR, 2018; Pike et al., 2020; Prieto-Ruiz & Goche-Télles, 2016). All this, despite the fact that since 2014, criteria have been established and published in the Mexican standard NMX-AA-169-SCFI-2016 "Establishment of Forest Germplasm Production Units and Management", which regulates the processes of collection, transportation, storage, processing, evaluation, and certification to improve the quality of plants used in reforestation (Secretaría de Economía, 2016).

Germplasm movement zones play a key role in mitigating plant adaptation issues at reforestation sites (Hamann et al., 2011; Pike et al., 2020). Germplasm movement involves seed collection (in some cases, cuttings for asexual propagation), seedling production in nurseries, and reforestation in sites where a suitable climate habitat for the seed source is anticipated in the future (Castellanos-Acuña et al., 2014, 2015; Sáenz-Romero et al., 2016). According to St. Clair et al. (2013) and Havens et al. (2015), seed collection zones are designated by overlaying a combination of climatic variables and delineating common areas as a seed collection zone where the species of interest is distributed, to move them to areas with a suitable climate for their development. Seed transfer zones are geographical areas where the germplasm of a native population can be transferred based on environmental conditions (present or future) similar to those of the seed origin, to minimize the risks of inadequate adaptation.

The study aimed to delineate seed transfer zones for reforestation activities within the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR) in Michoacán and Estado

En las últimas dos décadas, México ha implementado programas de reforestación y restauración como el Programa Nacional de Reforestación, el Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales y el actual programa 'Sembrando Vida', que han incrementado la demanda de germoplasma. Dicho programa es uno de los mayores esfuerzos de reforestación del gobierno federal (2018-2024) con una gran inversión destinada a la reducción de la desigualdad social y a la restauración de la cobertura forestal y agroforestal en sitios degradados, lo cual podría proporcionar ingresos económicos y servicios ambientales (captación de agua, carbono y preservación de la biodiversidad) en el futuro. El programa 'Sembrando Vida', al ser operado en su componente forestal por la Secretaría del Bienestar y no por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), aparentemente, no ha considerado aspectos técnicos importantes que podrían mejorar la supervivencia y el crecimiento de las reforestaciones y restauraciones, y parece ignorar los impactos esperados del cambio climático (Gallardo-Salazar et al., 2023). Estos últimos son los de mayor importancia en la planeación de las reforestaciones, ya que son y serán progresivamente más severos (Astudillo-Sánchez et al., 2017; Ipinza & Gutiérrez, 2014; Sáenz-Romero et al., 2020).

La insuficiencia de cumplimiento de la normatividad para la gestión del germoplasma que garantice el suministro de semillas y mejore las tasas de sobrevivencia son los principales retos que enfrentan las instituciones y organizaciones dedicadas a la reforestación y restauración (CONAFOR, 2018; Pike et al., 2020; Prieto-Ruiz & Goche-Télles, 2016). Todo ello, a pesar de que desde 2014 se han estipulado y publicado criterios en la norma mexicana NMX-AA-169-SCFI-2016 "Establecimiento de Unidades Productoras y Manejo de Germoplasma Forestal", misma que regula los procesos de colecta, transporte, almacenamiento, procesamiento, evaluación y certificación para mejorar la calidad de las plantas utilizadas en la reforestación (Secretaría de Economía, 2016).

Las zonas de movimiento de germoplasma desempeñan un papel clave para la mitigación de los problemas de adaptación de las plantas en los sitios de reforestación (Hamann et al., 2011; Pike et al., 2020). El movimiento de germoplasma consiste en la recolección de semillas (en algunos casos, esquejes para propagación asexual), producción de plántulas en vivero y reforestaciones en sitios donde se prevé un hábitat climático adecuado de la fuente de semillas en el futuro (Castellanos-Acuña et al., 2014, 2015; Sáenz-Romero et al., 2016). Según St. Clair et al. (2013) y Havens et al. (2015), las zonas de recolección de semillas se designan superponiendo alguna combinación de variables climáticas y delimitando áreas comunes como una zona de recolección de semillas donde la especie de interés se distribuye, para desplazarlas a las áreas con un clima

de México, as well as the “Sembrando Vida” program in the Meseta Purépecha in Michoacán, considering the impacts of climate change. The goal is to develop a practical tool for determining the appropriate seed sources and their target areas, considering that the suitable climatic conditions for a forest population may shift to a different location in the future. Although the primary focus is on enhancing the “Sembrando Vida” program, the zoning recommendations could be applicable to various reforestation and restoration initiatives.

Materials and Methods

Study areas

The study areas consist of the Meseta Purépecha in Michoacán, covering an approximate area of 660 000 hectares, and the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR) on the border between Michoacán and Estado de México, with an approximate area of 56 256 hectares. Both areas are located within the Trans-Mexican Volcanic Belt (Figure 1).

We prioritized the analysis in the indigenous region of the Meseta Purépecha, comprised of the indigenous community of Nuevo San Juan Parangaricutiro (NSJP), Paracho, Cherán, Chilchota, Nahuatzen, Tancítaro and Taretan, which have economic support for beneficiaries of the federal program ‘Sembrando Vida’ (Figure 2). Elevations in this region range from 1 600 to 3 860 m. The dominant climate is temperate sub-humid with rainfall between 800 and 1 100 mm per year, although the region’s rugged topography produces a wide variety of microclimates. Vegetation consists mainly of pine-oak forests, conifers and agriculture (Hall et al., 2015).

The MBBR serves as a winter refuge for the monarch butterfly *Danaus plexippus* (L.) with elevations between 1 800 to 3 640 m with steep slopes (Figure 2). The climate is temperate sub-humid with rainfall in summer with mean annual precipitation of 830 mm and mean annual temperature of 15 °C. The lower elevations are characterized by temperate pine-oak forest and mainly rainfed agricultural plots. At higher elevations, there is oyamel forest (*Abies religiosa* [Kunth] Schltdl. & Cham.), habitat of the monarch butterfly, with patches of grassland and shrublands (de Azcárate Cornide et al., 2003).

Climate data and habitat modeling

Data were obtained from Castellanos-Acuña et al. (2018), whose vector representation model files (shapefiles) are in the digital repository available at <https://doi.org/10.5281/zenodo.1052141>. These provide a seed zone system for Mexico based on a reference

adecuado para su desarrollo. Las zonas de transferencia de semillas son áreas geográficas donde el germoplasma de una población nativa puede ser trasladado con base en condiciones ambientales (presentes o futuras) similares a los del origen de la semilla, para disminuir los riesgos mínimos de adaptación inadecuada.

El objetivo del estudio fue definir zonas de transferencia de semillas para actividades de reforestación en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) en Michoacán y Estado de México, y el programa ‘Sembrando Vida’ en la Meseta Purépecha en Michoacán, considerando cambio climático. Con ello se espera generar una herramienta útil para decidir la fuente de semilla y su área de destino, intentando incorporar un elemento que se adapte al cambio climático, al reconocer que el clima propicio para una población forestal ocurrirá en un sitio distinto al actual. Si bien se pretende fortalecer la operación del programa ‘Sembrando Vida’, las recomendaciones de uso de la zonificación podrían usarse para cualquier programa de reforestación y restauración.

Materiales y métodos

Áreas de estudio

Las áreas de estudio están conformadas por la Meseta Purépecha en Michoacán, con una superficie aproximada de 660 000 ha, y la RBMM en la frontera entre Michoacán y Estado de México, con una superficie aproximada de 56 256 ha; ambas se encuentran en la Faja Volcánica Transmexicana (Figura 1).

Se prioriza el análisis en la región indígena de la Meseta Purépecha, conformado por la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (NSJP), Paracho, Cherán, Chilchota, Nahuatzen, Tancítaro y Taretan que cuentan con apoyos económicos para beneficiarios del programa federal ‘Sembrando Vida’ (Figura 2). Las elevaciones en esta región oscilan entre 1 600 a 3 860 m. El clima dominante es templado subhúmedo con precipitaciones entre 800 y 1 100 mm anuales, aunque la topografía accidentada de la región produce gran variedad de microclimas. La vegetación consiste principalmente en bosques de pino-encino, coníferas y agricultura (Hall et al., 2015).

La RBMM sirve de refugio invernal de la mariposa monarca *Danaus plexippus* (L.) con elevaciones entre 1 800 a 3 640 m con pendientes pronunciadas (Figura 2). El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano con precipitación media anual de 830 mm y temperatura media anual de 15 °C. Las elevaciones más bajas se caracterizan por tener bosque templado de pino-encino y parcelas agrícolas principalmente de temporal. A mayor altitud se encuentra el bosque de

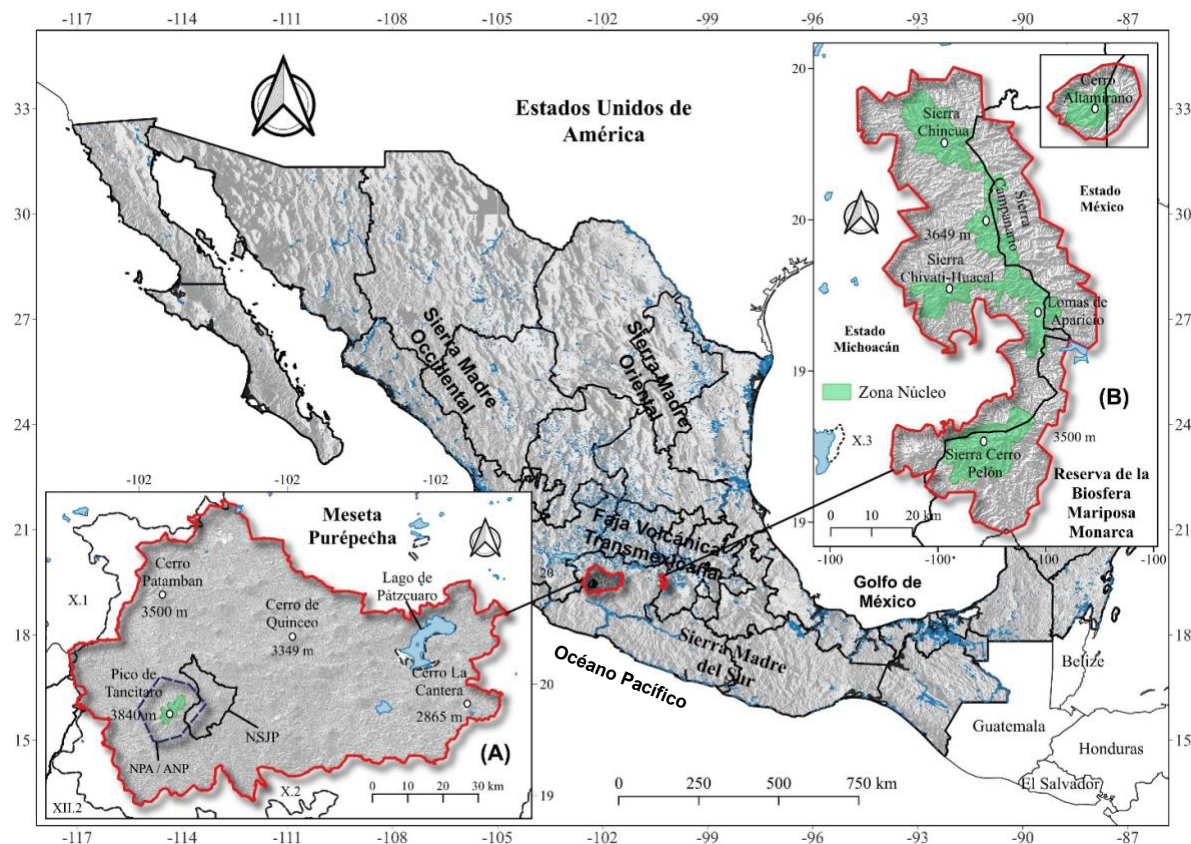


Figure 1. Political divisions of Mexico, prominent geographic regions and study areas: Meseta Purépecha in Michoacán and Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR) on the border of Michoacán and Estado de México. In the Meseta Purépecha, the indigenous community of Nuevo San Juan Parangaricutiro (NSJP) and the Pico de Tancitaro Natural Protected Area (NPA) are indicated.

Figura 1. Divisiones políticas de México, regiones geográficas prominentes y áreas de estudio: Meseta Purépecha en Michoacán y Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBBM) en la frontera de Michoacán y Estado de México. En la Meseta Purépecha se indica la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (NSJP) y el Área Natural Protegida (ANP) Pico de Tancitaro.

climate (1961-1990), a recent climate (1991-2010), and the projected climate for the average of the period 2041-2070, which we will refer to for simplicity as 2050 (Wang et al., 2016; <https://sites.ualberta.ca/~ahamann/data/climatena.html>). Climate zones were generated from mean coldest month temperature (MCMT) and an aridity index [$AI = (\text{mean annual temperature} + 10) / (\text{precipitation}/1000)$], to represent the relationship between temperature and plant-available moisture (Bower et al., 2014). Higher values indicate greater aridity.

The corresponding intervals for the MCMT are set every 3 °C. The aridity index intervals are variable in absolute values but have approximately the same width under a logarithmic transformation. The superposition of these two climate variables for the reference period (1961-1990) resulted in 63 climate zones (details in Castellanos-Acuña et al., 2018). Subsequently, that same zoning criterion was used for a projected forward-

oyamel (*Abies religiosa* [Kunth] Schltdl. & Cham.), hábitat de la mariposa monarca, con manchones de pastizal y zonas arbustivas (de Azcárate Cornide et al., 2003).

Datos climáticos y modelación de hábitat

Se obtuvieron datos de Castellanos-Acuña et al. (2018), cuyos archivos de modelos de representación vectorial (*shapefiles*) se encuentran en el repositorio digital disponible en <https://doi.org/10.5281/zenodo.1052141>. Estos proporcionan un sistema de zonas de semillas para México con base en un clima de referencia (1961-1990), un clima reciente (1991-2010) y el clima proyectado para el promedio del periodo 2041-2070, al cual nos referiremos por simplicidad como 2050 (Wang et al., 2016; <https://sites.ualberta.ca/~ahamann/data/climatena.html>). La zonificación climática se generó a partir de la temperatura media del mes más frío (MCMT, por su acrónimo en inglés) y un índice de aridez [$AI = (\text{temperatura media anual} + 10) / (\text{precipitación}/1000)$],

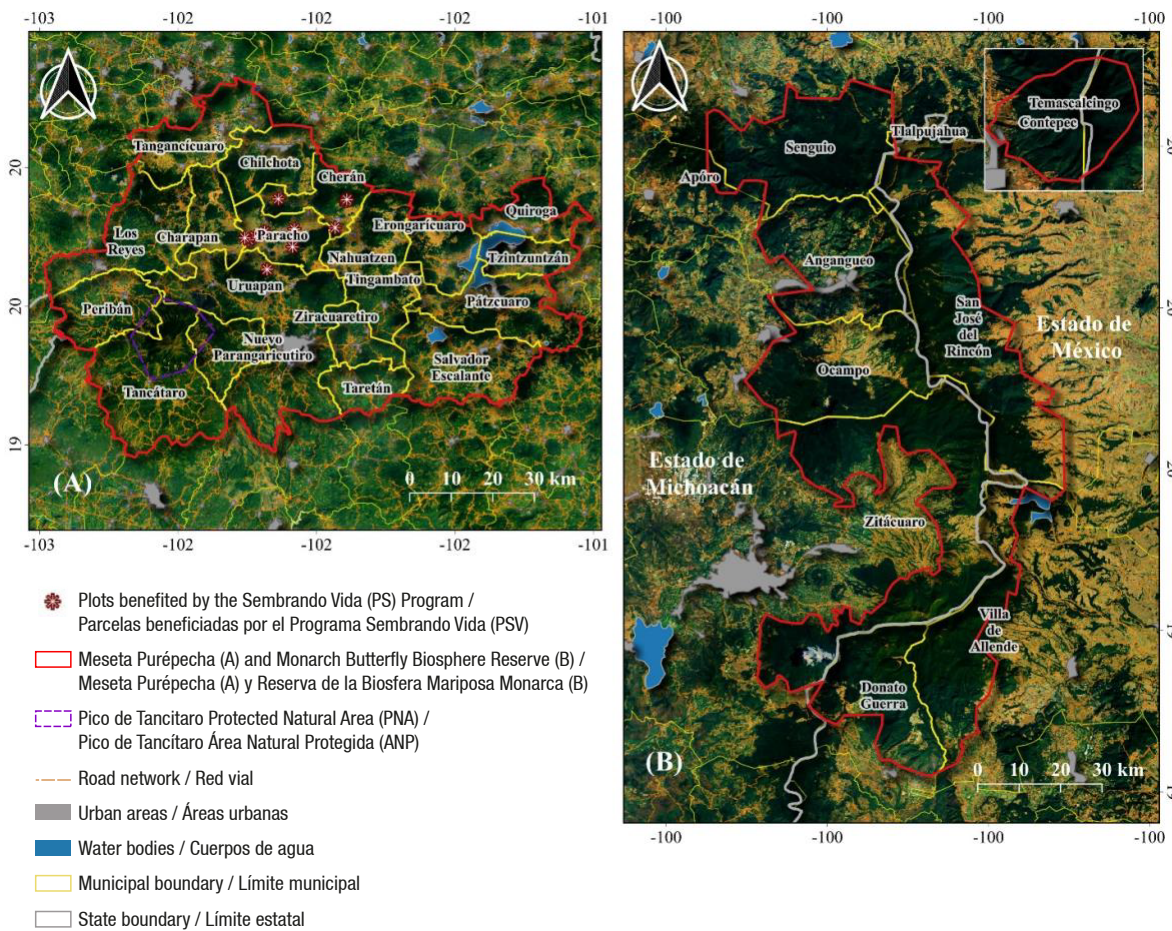


Figure 2. Description of study areas: A) Meseta Purépecha, Michoacán, and plots benefited by the ‘Sembrando Vida’ program and B) Monarch Butterfly Biosphere Reserve on the border of Michoacán and Estado de México.

Figura 2. Descripción de las áreas de estudio: A) Meseta Purépecha, Michoacán, y parcelas beneficiadas por el programa ‘Sembrando Vida’ y B) Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en la frontera de Michoacán y Estado de México.

looking scenario of the Representative Radiative Forcing Greenhouse Gas Concentration Trajectory (RCP) 4.5 $W \cdot m^{-2}$. This scenario is considered relatively optimistic; a pessimistic scenario (RCP 8.5 $W \cdot m^{-2}$) was not used, because it would imply excessive germplasm movement at present, which would generate a risk of frost damage to reforestation seedlings. Although the climate data grids under the reference and projected scenario of Castellanos-Acuña et al. (2018) have a spatial resolution of 1 km^2 , for this study it was reduced to 400 x 400 m in order to improve it.

As a complement to decide seed sources and destination areas, we used climate habitat modeling data for *P. pseudostrobus* Lindl. and *A. religiosa* from the reference period (1961-1990) and the future (decade centered on 2060) generated by Gómez-Pineda et al. (2020). The species under study have ecological, economic and conservation importance, which are distributed from the high and low parts of the physiographic provinces of Mexico. This is the case of the economic importance

para representar la relación entre la temperatura y la humedad disponible para las plantas (Bower et al., 2014). Los valores más elevados indican mayor aridez.

Los intervalos correspondientes para la MCMT están conformados cada 3 °C. Los intervalos del índice de aridez son variables en valores absolutos, pero tienen aproximadamente el mismo ancho bajo una transformación logarítmica. La superposición de estas dos variables climáticas para el periodo de referencia (1961-1990) resultó en 63 zonas climáticas (detalles en Castellanos-Acuña et al., 2018). Posteriormente, ese mismo criterio de zonificación se utilizó para un escenario proyectado a futuro de la Trayectoria de Concentración de Gases de Efecto Invernadero Representativa de Forzamiento Radiativo (RCP) 4.5 $W \cdot m^{-2}$. Este escenario se considera relativamente optimista; no se usó un escenario pesimista (RCP 8.5 $W \cdot m^{-2}$), porque implicaría un movimiento excesivo del germoplasma en el presente, que generaría un riesgo de daño por heladas en las plántulas de reforestación. Si bien las cuadrículas

of *P. pseudostrabus* (2200-3000 m; Farjon, 1997) for sawtimber production; also, the dense forest of *A. religiosa* (2400-3600 m) is of great importance for the conservation of the Monarch butterfly that spends the winter in the MBBR.

The objective of the zones was to find a coupling with the climate of the decade centered on the year 2050 or 2060. If a closer scenario were chosen (2030, for example) there is a risk that the transfer of seed sources will be an insufficient climate transfer and the planted trees will be stressed when they reach reproductive age or commercial size. A more distant scenario (2090, for example) involves the risk that seedlings will be planted on a site that is too cold at present and suffer severe frost damage.

Climatic habitat

The percentage change in climatic habitat suitable for *P. pseudostrabus* and *A. religiosa* was estimated from Gómez-Pineda et al. (2020) modeling of the projected seed collection area and reforestation area (deployment) for each tree species, based on the current and projected forward scenario for the average of the period 2056-2065, which we will refer to for simplicity as the decade centered on 2060 (Sáenz-Romero et al 2010; <https://charcoal2.cnre.vt.edu/climate/>). Habitat change was determined with the formula: % change = $[(S1-S0) / S0] * 100 \%$; where, S0 is the total area occupied by suitable climatic habitat in the study area according to the reference period (1961-1990) and S1 is the total area projected to occupy in the decade centered on 2060. This to visualize the reduction of the climatic habitat of the species under study in the Meseta Purépecha and MBBR.

Seed Transfer Zones

The area where forest vegetation is actually present (because climatic habitat usually overestimates the area actually occupied) was obtained from the temperate forest occurrence information layer published in Latorre-Cárdenas et al. (2023). The presence of *P. pseudostrabus* and *A. religiosa* was identified from the National Forest and Soil Inventory (INFYs) database produced by CONAFOR 2015-2020 (<https://snmf.cnf.gob.mx/datos-del-inventario/>). Based on the aforementioned data and the altitudinal range of the distribution of each species in the field, these layers were overlaid on the climatic habitat of each species, estimated by Gómez-Pineda et al. (2020), in the QGIS program version 3.32.1 (QGIS, 2023), for the location of sites with potentially seed-producing trees. The layer of Germplasm Movement Zones, indicated in the NMX-AA-169-SCFI-2016 standard (Secretaría de Economía, 2016), which are defined as areas with relatively similar ecological and climatic characteristics, was overlaid.

de datos climáticos bajo el escenario de referencia y proyectado de Castellanos-Acuña et al. (2018) tienen una resolución espacial de 1 km², para el presente trabajo se redujo a 400 x 400 m con el fin de mejorarla.

Como complemento para decidir las fuentes de semilla y las áreas de destino, se utilizaron datos del modelado del hábitat climático de *P. pseudostrabus* Lindl. y *A. religiosa* del periodo de referencia (1961-1990) y del futuro (década centrada en 2060) generados por Gómez-Pineda et al. (2020). Las especies en estudio tienen importancia ecológica, económica y de conservación, las cuales se distribuyen desde las partes altas y bajas de las provincias fisiográficas de México. Tal es el caso de la importancia económica de *P. pseudostrabus* (2200-3000 m; Farjon, 1997) para producción de madera para aserrío; asimismo, el bosque denso de *A. religiosa* (2400-3600 m) es de gran importancia para la conservación de la mariposa Monarca que pasa el invierno en la RBMB.

El objetivo de la zonificación fue buscar un acoplamiento con el clima de la década centrada en el año 2050 o 2060. Si se eligiera un escenario más cercano (2030, por ejemplo) se corre el riesgo de que la transferencia de fuentes de semilla sea un traslado climático insuficiente y los árboles plantados nuevamente estarán estresados al llegar a la edad reproductiva o de talla comercial. Un escenario más lejano (2090, por ejemplo) implica el riesgo de que las plántulas sean plantadas en un sitio demasiado frío en el presente y sufran un daño severo por heladas.

Hábitat climático

El porcentaje de cambio del hábitat climático propicio para *P. pseudostrabus* y *A. religiosa* se estimó a partir del modelaje de Gómez-Pineda et al. (2020) del área de recolección de semillas y el área de reforestación (deployment) proyectado para cada especie arbórea, con base en el escenario contemporáneo y futuro para el promedio del periodo 2056-2065, al cual nos referiremos por simplicidad como década centrada en 2060 (Sáenz-Romero et al 2010; <https://charcoal2.cnre.vt.edu/climate/>). El cambio de hábitat se determinó con la fórmula: % de cambio = $[(S1-S0) / S0] * 100 \%$; donde, S0 es la superficie total que ocupa su hábitat climático propicio en el área de estudio de acuerdo con el periodo de referencia (1961-1990) y S1 es la superficie total que se proyecta ocupará en la década centrada en 2060. Esto con el fin de visualizar la reducción del hábitat climático de las especies en estudio en la Meseta Purépecha y RBMM.

Zonas de transferencia de semillas

La superficie donde efectivamente hay vegetación forestal (debido a que el hábitat climático usualmente sobrestima el área realmente ocupada) se obtuvo de la capa de información de presencia de bosques

Finally, climatype maps were created, a subdivision of the climatic habitat suitable for each species resulting from superimposing on it the climate zones based on the MCMT and aridity index intervals. This to account for (at least partially) the fact that populations are adapted to a portion of the species' suitable climatic habitat and not to the whole habitat (see Sáenz-Romero et al., 2012b and Ortiz-Bibian et al., 2017 for *P. pseudostrobus* and *A. religiosa*, respectively). The climatype concept used is similar to that developed by Tchebakova et al. (2005) where the subdivision is determined by intervals of climatic values; however, in the present study, the size of the intervals was not based on the minimum significant difference between provenances, obtained in garden trials by those authors, but on zoning of Castellanos-Acuña et al. (2018).

Results and Discussion

Climate zones for seed collection and climate zones for reforestation

The boundaries of seed collection zones (1961-1990 reference climate) and deployment zones (projected climate for the 2050s, RCP 4.5 scenario) in the Meseta Purépecha and the MBBR resulted in 19 climate zones out of 63 reported for Mexico (Castellanos-Acuña et al. 2018; Figure 3). The MBBR reflects altitudinal gradients with warm areas at lower altitudes (in the direction of the Balsas Depression) and cooler areas in the mountains.

Under the current reference climate, in the region of the Meseta Purépecha, the coldest zones are found in the higher parts of the municipalities of Los Reyes and Tancítaro with elevations of 2794 to 3840 m; in contrast, the warmest regions are located in the south of Uruapan and Taretan, with altitudinal ranges of 630 to 1800 m (Figure 3A). In the case of the MBBR, the coldest areas are located in San José del Rincón and Villa de Allende, and the warmest areas are in the southern part of the municipality of Donato de Guerra in Estado de México (Figure 3C). However, both regions will be warmer and drier in the future according to projections for the year 2050 (Figure 3B and 3D). These changes can be seen by comparing the zoning under the reference climates (1961-1990) and the projected future climate (2050). For example, in the Meseta Purépecha, in the future, the green and blue areas (at their margins corresponding to lower altitude) that generally correspond to forests dominated by *P. pseudostrobus* are significantly reduced (Molina-Sánchez et al., 2019). Similarly, within the MBBR, dark blue areas are reduced, which generally correspond to oyamel fir forests (de Azcárate Cornide et al., 2003; Sáenz-Romero et al., 2012a).

templados publicada en Latorre-Cárdenas et al. (2023). La presencia de *P. pseudostrobus* y *A. religiosa* se identificó en la base de datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) producido por la CONAFOR 2015-2020 (<https://snmf.cnf.gob.mx/datos-del-inventario/>). A partir de los datos mencionados y del rango altitudinal de la distribución de cada especie en el terreno, se sobrepusieron dichas capas al hábitat climático de cada especie, estimado por Gómez-Pineda et al. (2020), en el programa QGIS versión 3.32.1 (QGIS, 2023), para la ubicación de sitios con árboles potencialmente productores de semilla. Igualmente, se sobrepuso la capa de las Zonas de Movimiento de Germoplasma, señaladas en la norma NMX-AA-169-SCFI-2016 (Secretaría de Economía, 2016), las cuales están definidas como áreas con características ecológicas y climáticas relativamente similares.

Finalmente, se generaron mapas de climatipos, una subdivisión del hábitat climático propicio para cada especie que resulta de superponer en él la zonificación climática basada en los intervalos de MCMT e índice de aridez. Esto a fin de verificar (al menos parcialmente) el hecho de que las poblaciones están adaptadas a una porción del hábitat climático propicio de la especie y no a la totalidad de él (ver Sáenz-Romero et al., 2012b y Ortiz-Bibian et al., 2017 para *P. pseudostrobus* y *A. religiosa*, respectivamente). El concepto usado de climatipo es similar al desarrollado por Tchebakova et al. (2005) en cuanto a que la subdivisión se hace con base en intervalos de valores climáticos; sin embargo, en el presente estudio, el tamaño de los intervalos no se basó en la diferencia mínima significativa entre procedencias, obtenida en ensayos de jardín por dichos autores, sino en la zonificación de Castellanos-Acuña et al. (2018).

Resultados y discusión

Zonas climáticas para la colecta de semillas y zonas climáticas para la reforestación

La delimitación de zonas de colecta de semillas (clima de referencia 1961-1990) y de destino para la reforestación (clima proyectado para la década 2050, escenario RCP 4.5) en la Meseta Purépecha y la RBMM resultó en 19 zonas climáticas de las 63 reportadas para México (Castellanos-Acuña et al. 2018; Figura 3). La MCMT refleja los gradientes altitudinales con áreas cálidas en altitudes menores (en la dirección de la Depresión del Balsas) y áreas más frías en las montañas.

Bajo el clima contemporáneo de referencia, en la región de la Meseta Purépecha, las zonas más frías se encuentran en las partes altas de los municipios de Los Reyes y Tancítaro con elevaciones de 2794 a 3840 m; en contraste, las regiones más cálidas se ubican en el sur de Uruapan y Taretan, con rangos altitudinales de 630 a

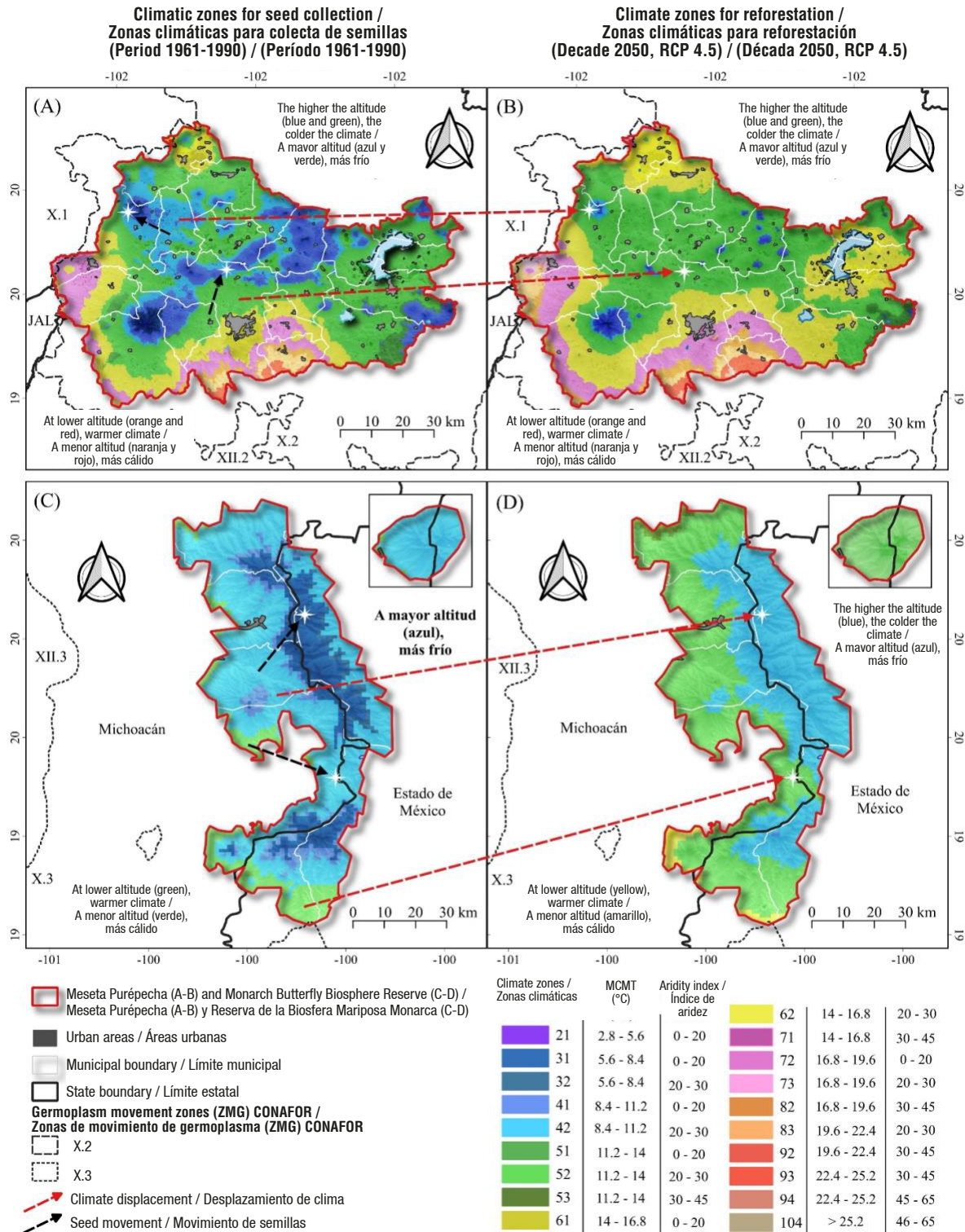


Figure 3. Climate zones for seed collection (defined under a 1961-1990 reference climate) and target zones for reforestation (deployment) under a future climate (2050, RCP 4.5), resulting from the intersection of the mean temperature of the coldest month (MCMT) and the aridity index, for the Meseta Purépecha and the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR). The arrows indicate where the climate currently occurring at a given site will occur (red arrows) and what the movement of germplasm might look like in the present to compensate for projected climate change (black arrows).

Figura 3. Zonas climáticas para la colecta de semillas (definidas bajo un clima de referencia 1961-1990) y zonas de destino para reforestación bajo un clima futuro (2050, RCP 4.5), resultantes de la intersección de la temperatura media del mes más frío (MCMT) y el índice de aridez, para la Meseta Purépecha y la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM). Las flechas indican dónde ocurrirá el clima que actualmente ocurre en un sitio dado (flechas rojas) y cómo podría ser el movimiento de germoplasma en el presente para compensar el cambio climático proyectado (flechas negras).

The reduction of climate zones suitable for conifers in the Meseta Purépecha and in the MBBR will generate decoupling between the areas currently occupied by forest populations and the site where the climate for which they have adapted through a long evolutionary process have occurred (Sáenz-Romero et al., 2016). In other words, the climate in which forest populations have evolved will occur in the future in a different location (at a higher altitude in our case) or may even disappear altogether (Rehfeldt et al., 2012). This displacement of the suitable climate will occur at a much faster rate than the eventual displacement of forest populations by natural means (seed dispersal and colonization of new sites). Thus, trees that will remain on a site with adverse climate will progressively suffer more and more stress from warmer droughts, predisposing them to pest and disease attack and, eventually, death (Gómez-Pineda et al., 2020; Hammond et al., 2022; Rehfeldt et al., 2014; Sáenz-Romero et al., 2016, 2023; Seda & Ömer, 2019).

The effects of the decoupling between forest populations and favorable climate are already observable. In the Meseta Purépecha, branch defoliation has been detected during the dry season in the xeric limit of *P. pseudostrabus*. Tree branches that often no longer recover during the following rainy season accumulate dead branches to a threshold where they become severely weakened, and these are candidates for attack by bark beetles, causing total tree death (López-Toledo et al., 2017). Similarly, defoliation was observed in *A. religiosa* in the MBBR (Sáenz-Romero, 2015) and on Cerro Tláloc (Flores-Nieves et al., 2011), apparently related to climate change.

This situation calls for proactive management for the re-coupling of forest populations to a favorable climate, even if it means they will occur in a different location. As a general strategy, regardless of the forest species, it is possible to use the climate zoning in Figure 3 as a guide for seed transfer aimed at approximating such a coupling. The way to proceed would be as follows:

1. Select the site to be reforested on the current climate zoning map (1961-1990 reference climate) (Figures 3A or 3C).
2. Locate the same site to reforest, but on the 2050 climate zoning map (Figures 3B or 3D) in order to determine the possible future climate.
3. Return to the current climate map (Figures 3A or 3C) and locate the zones where the climate that will occur in the future is currently found at the site to be reforested. These zones with current climate are the zones of present-day seed collection.

1800 m (Figura 3A). Para el caso de la RBMM, las zonas más frías se encuentran en San José del Rincón y Villa de Allende, y las zonas más cálidas en la parte sur del municipio de Donato de Guerra del Estado de México (Figura 3C). No obstante, ambas regiones serán más cálidas y secas en el futuro acorde con las proyecciones para el año 2050 (Figura 3B y 3D). Dichos cambios se pueden apreciar comparando la zonificación bajo los climas de referencia (1961-1990) y el proyectado al futuro (2050). Por ejemplo, en la Meseta Purépecha, en el futuro se reducen significativamente las áreas color verde y azul (en sus márgenes que corresponden a menor altitud) que en lo general corresponden a bosques dominados por *P. pseudostrabus* (Molina-Sánchez et al., 2019). De manera similar, dentro de la RBMM se reducen las áreas de colores azul oscuros que, en lo general, corresponden a los bosques de oyamel (de Azcárate Cornide et al., 2003; Sáenz-Romero et al., 2012a).

La reducción de las zonas climáticas propicias para coníferas en la Meseta Purépecha y en la RBMM generarán desacoplamiento entre las áreas ocupadas actualmente por las poblaciones forestales y el sitio donde ocurrirá el clima para el cual se han adaptado mediante un largo proceso evolutivo (Sáenz-Romero et al., 2016). En otras palabras, el clima en el cual las poblaciones forestales han evolucionado ocurrirá en el futuro en un lugar diferente (a mayor altitud en nuestro caso) o incluso podría desaparecer por completo (Rehfeldt et al., 2012). Este desplazamiento del clima propicio ocurrirá a una velocidad mucho mayor que el eventual desplazamiento de las poblaciones forestales por medios naturales (dispersión de semillas y colonización de nuevos sitios). Por ello, los árboles que permanecerán en un sitio con clima adverso sufrirán progresivamente más estrés por sequías más cálidas, lo que los predispondrá al ataque de plagas y enfermedades y, eventualmente, a la muerte (Gómez-Pineda et al., 2020; Hammond et al., 2022; Rehfeldt et al., 2014; Sáenz-Romero et al., 2016, 2023; Seda & Ömer, 2019).

Los efectos del desacoplamiento entre poblaciones forestales y clima propicio ya son observables. En la Meseta Purépecha se ha detectado defoliación de ramas durante la época de sequía en el límite xérico de *P. pseudostrabus*. Las ramas de los árboles que con frecuencia ya no se recuperan durante la siguiente temporada de lluvias, acumulan ramas muertas hasta un umbral en el que se debilitan seriamente, y estas son candidatas al ataque de escarabajos descortezadores, causando la muerte total del árbol (López-Toledo et al., 2017). De manera similar, se observó defoliación en *A. religiosa* en la RBMM (Sáenz-Romero, 2015) y en el cerro Tláloc (Flores-Nieves et al., 2011), aparentemente relacionada con el cambio climático.

Figure 3 shows the above procedure with reforestation sites indicated with a white star. For example, the upper star of the planting site, both within the Meseta Purépecha (Figure 3A) and the MBBR (Figure 3C), is in a dark blue climatic zone (MCMT = 5 to 8 °C; IA = 2 to 20) and becomes warmer in the future (light blue, MCMT = 8 to 11 °C) and drier (IA = 20 to 30). For the lower star example (Figures 3B and 3D), the area to be reforested is light blue and becomes warmer (dark green, MCMT = 11 to 14 °C, AI = 20 to 30). For this second case, it is suggested to collect seeds under the current climate (green color), produce seedlings in the nursery and, subsequently, reforest sites where that same green climate will occur, but projected for the year 2050 (according to the maps based on the climate zones of Castellanos-Acuña et al., 2018). In practice, it would be advisable that nursery production be done in the climatic region of the site to be reforested to facilitate plant acclimatization, even if the seed is imported from warmer sites. In other words, the transfer of germplasm from the site chosen as seed source to the planting (deployment) site is preferable, as far as possible, to transport the seed for nursery supply rather than transporting the plant once it's already grown.

Location of collection and reforestation zones using the suitable climatic habitat for reforestation

Although the use of the previously described climatic zoning is considered an advancement, it's important to note that in the climatic zones currently compatible with the future climate of the site to be reforested, the species of interest desired for reforestation may or may not be available. This is because the climatic zones compatible with the future climate are usually located at lower altitudes, where a different forest species could be distributed or even the original arboreal vegetation could no longer exist due to land use change.

While the climatic habitat projection can guide the location of potential collection sites for a species of current interest, the fact that the suitable climatic habitat is in a location does not guarantee the presence of the species. This can be due to a multitude of factors that prevent it: competition effects from other species, lack of propagules that have previously colonized the site, illegal logging, and others such as the change in land use from temperate forest to avocado orchards in Michoacán (Latorre-Cárdenas et al., 2023).

One way to have a more realistic approach to identifying potential seed collection sites is to overlay the climatic habitat of the species of interest with a vegetation map, in this case, of pine-oak, pine, and conifer forests (obtained in Latorre-Cárdenas et al., 2023). The result is shown in Figure 4, where it is possible to notice that the area occupied by the suitable

Tal situación hace necesario un manejo proactivo para el reacoplamiento de las poblaciones forestales al clima propicio, pero que ocurrirá en un lugar distinto. Como estrategia general, independientemente de la especie forestal, es posible utilizar la zonificación climática de la Figura 3 como guía para la transferencia de semillas que tenga como objetivo la aproximación a tal reacoplamiento. La forma de proceder sería la siguiente:

1. Seleccionar el sitio a reforestar en el mapa de la zonificación climática contemporánea (clima de referencia 1961-1990) (Figuras 3A o 3C).
2. Ubicar el mismo sitio a reforestar, pero en el mapa de zonificación climática del 2050 (Figuras 3B o 3D) a fin de determinar el clima posible en el futuro.
3. Regresar al mapa del clima contemporáneo (Figuras 3A o 3C) y ubicar las zonas donde actualmente se encuentra el clima que ocurrirá en el futuro en el sitio a reforestar. Tales zonas del contemporáneo son las zonas de coleta de semilla en el presente.

El procedimiento anterior se ilustra con sitios para reforestación indicados con una estrella blanca en la Figura 3. Por ejemplo, la estrella superior del lugar de plantación, tanto dentro de la Meseta Purépecha (Figura 3A) como en la RBMM (Figura 3C), se encuentra en una zona climática azul oscuro (MCMT = 5 a 8 °C; IA = 2 a 20) y se vuelve más cálida en el futuro (azul claro, MCMT = 8 a 11 °C) y más seca (IA = 20 a 30). Para el ejemplo de la estrella inferior (Figuras 3B y 3D), la zona que se desea reforestar es azul claro y se vuelve más cálida (verde oscuro, MCMT = 11 a 14 °C, IA = 20 a 30). Para este segundo caso se sugiere la recolección de semillas bajo el clima actual (color verde), la producción de plántulas en el vivero y, posteriormente, la reforestación de sitios donde ocurrirá ese mismo clima verde, pero proyectado para el año 2050 (acorde con los mapas basados en las zonas climáticas de Castellanos-Acuña et al., 2018). En la práctica, sería recomendable que la producción en vivero se hiciera en la región climática del sitio a reforestar, a fin de facilitar la aclimatación de las plantas, aun cuando la semilla sea importada de sitios más cálidos. En otras palabras, el traslado de germoplasma del sitio elegido como fuente de semilla al sitio de plantación, es preferible, en la medida de lo posible, mediante el traslado de la semilla para el abastecimiento de los viveros y no mediante el traslado de la planta ya producida.

Ubicación de zonas de colecta y de reforestación utilizando el hábitat climático propicio

Aunque el uso de la zonificación climática descrita previamente se considera un avance, es importante advertir que, en las zonas climáticas actualmente compatibles con el clima del futuro del sitio a

climatic habitat, both for *P. pseudostrobus* and *A. religiosa*, is much larger (particularly for the former species) than the area with forest effectively available for seed collection.

It is also important to note that the area for reforestation with the species of interest is significantly reduced when considering the expected effects of climate change, compared to the current area potentially useful for seed collection at present (Figures 4A and 4C), due to the progressive reduction of climatic habitat suitable for conifers, as a result of climate change (Figures 4B and 4D). Site options for planting a conifer species of interest are reduced because of a projected 48 % decrease in favorable climatic habitat for

reforestar, podría existir o no la especie de interés con la que se desea reforestar. Lo anterior debido a que las zonas climáticas compatibles con el clima futuro, habitualmente, se encuentran a menor altitud, donde podría distribuirse una especie forestal distinta o incluso podría ya no existir vegetación arbórea original, debido al cambio de uso de suelo.

Si bien la proyección del hábitat climático puede servir de guía para la ubicación de los sitios potenciales de colecta de una especie de interés en la actualidad, el hecho de que el hábitat climático propicio esté en un lugar no garantiza que la especie esté presente. Esto puede deberse a una multitud de factores que lo impidan: efectos de competencia por otras especies,

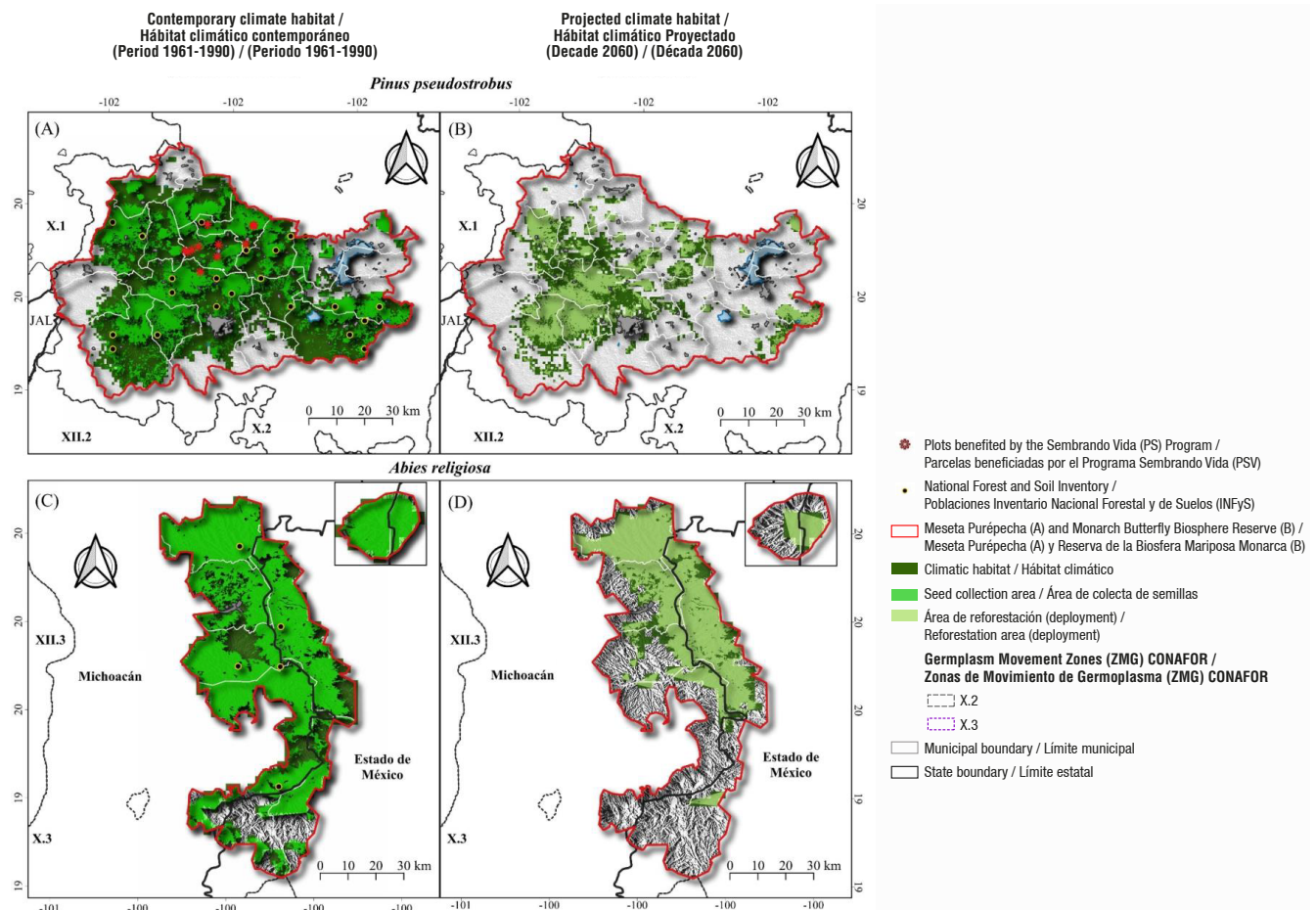


Figure 4. Suitable climatic habitat for *P. pseudostrobus* and *A. religiosa*, seed collection areas of the current period (1961-1990) and reforestation areas (deployment) to match the future climate (2060s) in the Meseta Purépecha and Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Michoacán and Estado de México, respectively. The seed collection area and reforestation layer overlapped with the current and future climate habitat layer, respectively. Suitable climatic habitat based on Gómez-Pineda et al. (2020) and area effectively covered by forest according to Latorre-Cárdenas et al. (2023).

Figura 4. Hábitat climático propicio para *P. pseudostrobus* y *A. religiosa*, áreas de recolección de semillas del periodo contemporáneo (1961-1990) y áreas de reforestación (deployment) para acoplarse con el clima futuro (década 2060) en la Meseta Purépecha y Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en Michoacán y Estado de México, respectivamente. La capa de área de recolección de semilla y de reforestación están superpuestas a la capa de hábitat climático contemporáneo y futuro, respectivamente. Hábitat climático propicio basado en Gómez-Pineda et al. (2020) y superficie efectivamente cubierta por bosque de acuerdo con Latorre-Cárdenas et al. (2023).

P. pseudostrobus in the Meseta Purépecha and 49 % in the MBBR for *A. religiosa* (Figure 5). This is not exclusive to the two areas studied, but a general trend for temperate forests in Mexico (Rehfeldt et al., 2012).

The double reduction of options (scarce trees effectively present within the current climatically favorable habitat and the reduction of this in the future) affects, for example, the beneficiaries of the federal program ‘Sembrando Vida’ (plots shown in Figures 4A and 4B). For them, the priority species for reforestation is *P. pseudostrobus* in the Meseta Purépecha. In the case of the MBBR, the options of sites for obtaining seed at low altitude and sites for reforestation with *A. religiosa* are reduced, due to the change of land use in the lower limit of the *A. religiosa* forest and the reduction of its favorable habitat in the future, particularly in the southern part (Figures 4C and 4D).

For *P. pseudostrobus* and *A. religiosa*, the reduction of suitable habitat occurs at the lower altitudinal limit, which has been called the ‘xeric limit’ because it is warmer and, therefore, usually drier than the rest of the climatic habitat (Mátyás, 2010). Therefore, in the lower altitudinal band of climatic habitat that will disappear, it will be necessary to consider the

falta de propágulos que hayan colonizado previamente el sitio, tala ilegal y otros como el cambio de uso de suelo de bosque templado a huertas de aguacate en Michoacán (Latorre-Cárdenas et al., 2023).

Una manera de tener una aproximación más realista para la identificación de los lugares potenciales de colecta de semilla es superponer el hábitat climático de la especie de interés con un mapa de vegetación, en este caso de pino-encino, pino y coníferas (obtenido en Latorre-Cárdenas et al., 2023). El resultado se muestra en la Figura 4, donde es posible notar que el área ocupada por el hábitat climático propicio, tanto para *P. pseudostrobus* como para *A. religiosa*, es mucho más amplio (particularmente para la primera especie) que el área con bosque efectivamente disponible para la colecta de semilla.

También es importante señalar que el área para reforestar con las especies de interés es mucho más reducida cuando se consideran los efectos esperados del cambio climático, comparada con el área contemporánea potencialmente útil para la colecta de semilla en el presente (Figuras 4A y 4C), debido a la reducción progresiva del hábitat climático propicio para las coníferas, por efecto del cambio climático

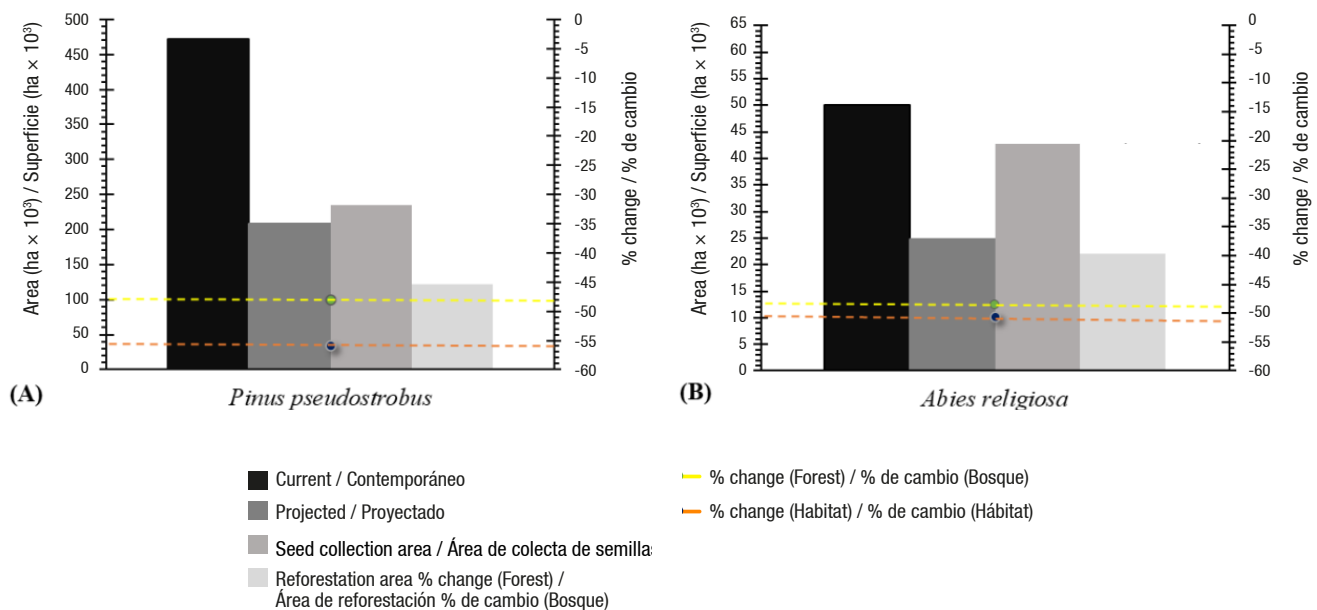


Figure 5. Climatic habitat, seed collection areas and reforestation areas (deployment) of the analyzed species according to the current scenario (1961-1990) and projected scenario (2060s) in the Meseta Purépecha (A) and Monarch Butterfly Biosphere Reserve (B). The total area (ha) is presented with percentages (%) of change with respect to the present. There is a significant reduction in the area of climatic habitat for each taxon in the study area.

Figura 5. Hábitat climático, áreas de recolección de semillas y áreas de reforestación (*deployment*) de las especies analizadas de acuerdo con el escenario contemporáneo (1961-1990) y proyectado (década 2060) en la Meseta Purépecha (A) y Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (B). Se presenta la superficie total (ha) con sus porcentajes (%) de cambio respecto al presente. Se observa una importante reducción de la superficie del hábitat climático de cada taxón en el área de estudio.

replacement of species by one adapted to warmer sites: *P. devoniana* could replace *P. pseudostrobus* at low altitudes in the Meseta Purépecha (Sáenz-Romero et al., 2012b) and *P. pseudostrobus* would replace *A. religiosa* in the lower parts of the MBBR buffer zone (Ortiz-Bibian et al., 2017).

Subdivision of climatic habitat into climatypes

Subdivision of the climatic habitat of *P. pseudostrobus* and *A. religiosa* by overlaying the climatic zoning of Castellanos-Acuña et al. (2018) with the present and future climatic habitat developed by Gómez-Pineda et al. (2020), generated 10 'climatypes' (climatically defined, not based on provenance trials in the sense of Rehfeldt & Jaquish [2010] or Tchebakova et al. [2005]), under current climate in the Meseta Purépecha (Figure 6A) and five in the MBBR (Figure 6C). The projection of these same climatetypes for the year 2050 shows that the colder ones will severely decrease or disappear, while the warmer ones will expand their area (Figures 6B and 6D). For example, the sites currently occupied by the climatetypes indicated as 'dark blue' and 'light blue' will be replaced by warmer ones represented by 'light blue' and 'green', respectively (Figure 6).

The guidelines for the use of the climatetypes shown in Figure 6 are essentially the same as those described for the climate zones in Figure 3. Seed collected within a climatype should be used to produce seedlings to be used in reforestation sites that will be within the same climatype in the future. For example, seed collected from sites within the 'light blue' climatype (Figure 6A or 6C) should be used in reforestation of sites occupied by the future 'light blue' climatype (Figure 6B or 6D). This subdivision of suitable climatic habitat allows accounting, at least in part, for genetic differentiation among populations within the species, which has been demonstrated with provenance trials from climatically contrasting sites, planted at sites with climates different from the seed origin (Leites et al., 2012a, 2012b).

Implications of Management Adaptive to Climate Change

The use of current climatic zones for seed collection and climatic zones for reforestation purposes, which partially overlap but are not the same, implies the change of a central paradigm. Before climate change, it was assumed that local seed sources would provide seedlings with the ability to adapt to a reforestation site close to the collection site (Giencke et al., 2018). The climate change that is taking place, with the consequent mismatch between seed source climate and the site with a favorable climate for the planted trees when they reach adulthood, requires that adaptive management to a changing climate include partial

(Figuras 4B y 4D). Las opciones de sitios para la plantación de una especie de conífera de interés se reducen debido a que se proyecta una disminución del 48 % del hábitat climático propicio para *P. pseudostrobus* en la Meseta Purépecha y del 49 % en la RBMM para *A. religiosa* (Figura 5). Esto no es exclusivo de las dos áreas estudiadas, sino una tendencia general para los bosques templados de México (Rehfeldt et al., 2012).

La doble reducción de opciones (arbolado escaso efectivamente presente dentro del hábitat climático propicio contemporáneo y la reducción de este en el futuro) afecta por ejemplo a los beneficiarios del programa federal 'Sembrando Vida' (parcelas señaladas en las Figuras 4A y 4B). Para ellos, la especie prioritaria para reforestación es *P. pseudostrobus* en la Meseta Purépecha. En el caso de la RBMM, las opciones de sitios para la obtención de semilla a baja altitud y de sitios para reforestación con *A. religiosa* son reducidas, por el cambio de uso de suelo en el límite inferior del bosque de *A. religiosa* y por la reducción de su hábitat propicio en el futuro, particularmente en la parte sur (Figuras 4C y 4D).

Para *P. pseudostrobus* y *A. religiosa*, la reducción de hábitat propicio ocurre en el límite inferior altitudinal, el cual ha sido denominado 'límite xérico' por ser más cálido y, por tanto, usualmente más seco que el resto del hábitat climático (Mátyás, 2010). Por ello, en la franja altitudinal inferior de hábitat climático que desaparecerá, será necesario considerar el reemplazo de especie por una adaptada a sitios más cálidos: *P. devoniana* podría sustituir a *P. pseudostrobus* en altitudes bajas en la Meseta Purépecha (Sáenz-Romero et al., 2012b) y *P. pseudostrobus* reemplazaría a la especie *A. religiosa* en las partes bajas de la zona de amortiguamiento de la RBMM (Ortiz-Bibian et al., 2017).

Subdivisión del hábitat climático en climatipos

La subdivisión del hábitat climático de *P. pseudostrobus* y *A. religiosa* mediante la superposición de la zonificación climática de Castellanos-Acuña et al. (2018) con el hábitat climático presente y futuro desarrollado por Gómez-Pineda et al. (2020), generó 10 'climatipos' (definidos climáticamente, no con base en ensayos de procedencia en el sentido de Rehfeldt & Jaquish [2010] o de Tchebakova et al. [2005]), bajo clima contemporáneo en la Meseta Purépecha (Figura 6A) y cinco en la RBMM (Figura 6C). La proyección de esos mismos climatipos para el año 2050 muestra que los más fríos disminuirán severamente o desaparecerán, mientras que los más cálidos ampliarán su superficie (Figuras 6B y 6D). Por ejemplo, los sitios ocupados actualmente por los climatipos indicados como 'azul oscuro' y 'azul claro' serán reemplazados por otros más cálidos representados por 'azul claro' y 'verde', respectivamente (Figura 6).

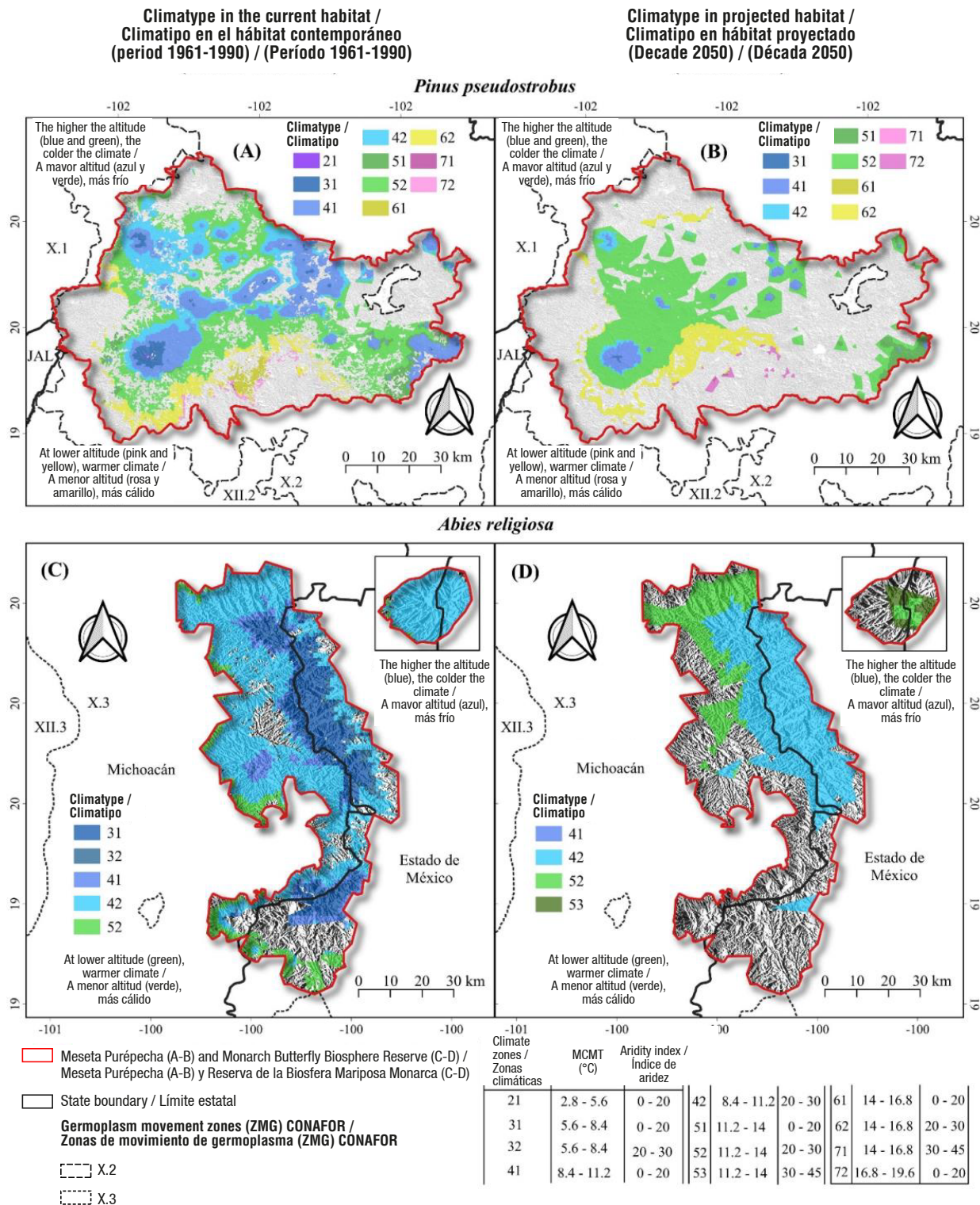


Figure 6. Climatipes (subdivision of the favorable climatic habitat based on mean coldest month temperature [MCMT] intervals and aridity index) of *Pinus pseudostrobus* in the Meseta Purépecha and Monarch Butterfly Biosphere Reserve in the state of Michoacán and Estado de México in the current (1961-1990) and projected climate for the decade to 2050.

Figura 6. Climatipos (subdivisión del hábitat climático propicio con base en los intervalos de la temperatura media del mes más frío [MCMT] e índice de aridez) de *Pinus pseudostrobus* en la Meseta Purépecha y *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca del estado de Michoacán y Estado de México en el clima contemporáneo (1961-1990) y proyectado para la década centrada al 2050.

abandonment of the idea that the local seed source is the desirable one (Ipinza & Gutiérrez, 2014; Sáenz-Romero et al., 2016). Recent evidence of catastrophic forest fires linked to climate change (e.g. 18 million ha in the summer of 2023 in Canada), and the exceeded threshold of +1.5 °C mean annual temperature compared to the pre-industrial period, indicate a clear acceleration of climate change, which makes it even more urgent to take management measures other than the usual ones (Sáenz-Romero, 2024).

A central decision is to determine how far it is acceptable to move a seed source from the collection site to the reforestation site. This involves determining which future scenario is the desired outcome for which alignment is sought, which in turn implies choosing a future time horizon and a greenhouse gas concentration scenario (RCP 4.5, 6.0 or 8.5). It also requires knowledge of the adaptive phenotypic plasticity that will allow a plant to survive in a site that is initially cooler than the one to which it is transferred, but which will be close to its optimum in the future. At least for shade tolerant species, such as *A. religiosa*, an alternative for the protection of newly established seedlings at a higher altitude than their origin is the use of shrubs as nurse plants, which has been successfully experimented in the MBBR core zone (Carbajal-Navarro et al., 2019).

Experiments of assisted migration in North America indicate from accumulated experience that a climatic transfer (difference between destination and origin climate) of the order of 2 °C to 3 °C to colder sites (in this case to sites of higher altitude) is acceptable (Sáenz-Romero et al., 2021). In the present proposal for the use of present and future climate zones, the transfer from one climate zone to the contiguous colder one, implies a movement of 3 °C on average, due to the definition of 3 °C intervals that was used for the zoning of Castellanos-Acuña et al. (2018). The transfer movement is recommended to be done as soon as possible so that when *P. pseudostrobus* and *A. religiosa* trees are approximately 25 years old in 2050 (reproductive age; Madrigal-Sánchez, 1967), they have the conditions to reproduce successfully, being in a favorable climatic habitat.

Reforestation with seedlings originating from seed collected in a site with a climate similar to the future climate of the target area should be carried out prioritizing sites that are already disturbed (by deforestation, forest fires or pest outbreaks) and, preferably, not replacing natural stands that are still healthy.

In the species and regions analyzed in this study, the movement of seed sources to destination sites in reforestations is possible, since there are still sites

Las reglas para el uso de los climatipos representados en la Figura 6 son esencialmente las mismas que las descritas para las zonas climáticas de la Figura 3. La semilla que se colecte dentro de un climatipo debe usarse para la producción de plántulas que se utilizarán en sitios de reforestación que en el futuro estarán dentro del mismo climatipo. Por ejemplo, la semilla colectada en sitios dentro del climatipo ‘azul claro’ (Figura 6A o 6C) deberá usarse en reforestación de sitios ocupados por el climatipo ‘azul claro’ del futuro (Figura 6B o 6D). Esta subdivisión del hábitat climático propicio permite contabilizar, por lo menos en parte, la diferenciación genética entre poblaciones dentro de la especie, la cual se ha demostrado con ensayos de procedencia de sitios climáticamente contrastantes, plantados en sitios con climas distintos al origen de la semilla (Leites et al., 2012a, 2012b).

Implicaciones del manejo adaptativo ante el cambio climático

El uso de zonas climáticas contemporáneas para la colecta de semillas y las zonas climáticas para el destino de las reforestaciones, que se superponen parcialmente pero no son las mismas, implica el cambio de un paradigma central. Hasta antes del cambio climático se asumía que la fuente de semillas locales, implícitamente, proporcionaría a las plántulas la capacidad de adaptación a un sitio de reforestación cercano al de colecta (Giencke et al., 2018). El cambio climático que está ocurriendo, con el consiguiente desfase entre clima de origen de las semillas y el sitio con clima propicio para los árboles plantados cuando lleguen a la edad adulta, requiere que el manejo adaptativo a un clima cambiante incluya el abandono parcial de la idea de que la fuente de semilla local es la deseable (Ipinza & Gutiérrez, 2014; Sáenz-Romero et al., 2016). Las evidencias recientes de incendios forestales catastróficos ligados al cambio climático (v. g. 18 millones de ha en el verano de 2023 en Canadá), y el umbral excedido de +1.5 °C de media anual de temperatura respecto al periodo industrial, indican una aceleración clara del cambio climático, lo que hace aún más urgente la toma de medidas de manejo distintas a las usuales (Sáenz-Romero, 2024).

Una decisión central es determinar hasta donde es aceptable la movilización de una fuente de semillas del sitio de colecta al sitio de reforestación. Esto requiere decidir cuál escenario en el futuro es el objetivo para el cual se desea el acoplamiento, que a su vez implica elegir un horizonte de tiempo futuro y un escenario de concentración de gases de efecto invernadero (RCP 4.5, 6.0 u 8.5). Asimismo, requiere conocer la plasticidad fenotípica adaptativa que permita a una planta sobrevivir en un sitio inicialmente más frío al que se

high enough in altitude to achieve at least some degree of adaptation to future climates. There are other much more difficult cases, such as *Picea mexicana* Martínez, where the best option would be an assisted transcontinental migration to save it from extinction (Mendoza-Maya et al., 2022).

Limitations of the climate zoning proposal

While the use of the proposed current and future climatic zoning will contribute to reducing the risks of seedling maladaptation and subsequently, adult trees to future climates, there are other factors that could influence the success of reforestation efforts. For example, the availability of viable seeds in sufficient quantities for reforesting priority areas, quality of nursery-produced plants, planting date, competition between the planted species and existing ones at the destination (deployment) site, as well as soil conditions, exposure, and slope degree. These factors could decrease the expected survival rate; therefore, it is essential that, in addition to the proposed zoning to decide on seed source and destination site, there is input from forestry experts, biologists, and local stakeholders who can assess whether the planting site has soil and vegetation conditions compatible with the selected species and origin chosen for reforestation.

Conclusions

Climate is causing a mismatch between the site occupied by forest species populations and the location of the climate to which they are adapted. This generates the need for more proactive management of forest genetic resources, aimed at achieving realignment once again. It is recommended to move seed sources from warmer and drier locations to currently cooler and wetter (on average 3 °C cooler) planting sites, to compensate for the climate change that has already occurred and is expected to continue over the next decades. To facilitate such a decision, the use of a climatic zoning (3 °C intervals and a variable interval aridity index) is proposed, in which the seed source under current climate (1961-1990) belongs to the same climatic zone as the site to be reforested, regarding a future scenario (RCP 4.5, year 2050).

Acknowledgments

The authors thank the National Council of Humanities, Science, and Technology (CONAHCYT in Spanish) for the support of postdoctoral scholarship to the first author (CVU 469568) and AGZC (CVU 550990), a graduate scholarship to JLGZ (scholarship 815176), and to the IIXM program (Researchers for Mexico) for funding VOV. To DGAPA-UNAM for a postdoctoral fellowship to EGP. To the Monarch Butterfly Fund

le transfiera, pero que será cercano a su óptimo en el futuro. Al menos para especies tolerantes a la sombra, como lo es *A. religiosa*, una alternativa para la protección de las plántulas recién establecidas a mayor altitud que su origen, es el uso de arbustos como plantas nodriza, lo cual se ha experimentado con éxito en la zona núcleo de la RBMM (Carbajal-Navarro et al., 2019).

Experimentos de migración asistida en Norteamérica indican por experiencia acumulada que una transferencia climática (diferencia entre clima de destino y el de origen) del orden de 2 °C a 3 °C hacia sitios más fríos (en este caso a sitios de mayor altitud) es aceptable (Sáenz-Romero et al., 2021). En la presente propuesta de uso de zonas climáticas presentes y futuras, la transferencia de una zona climática a la contigua más fría, implica un movimiento de 3 °C en promedio, debido a la definición de intervalos de 3 °C que se utilizó para la zonificación de Castellanos-Acuña et al. (2018). El movimiento de transferencia se recomienda hacerlo cuanto antes para cuando los árboles de *P. pseudostrobus* y *A. religiosa* tengan aproximadamente 25 años en el 2050 (edad reproductiva; Madrigal-Sánchez, 1967), estos cuenten con las condiciones para reproducirse con éxito, al estar en un hábitat climático propicio.

La reforestación con plántulas originadas de semilla colectada en un sitio con clima similar al clima futuro del área de destino debe realizarse priorizando sitios que ya se encuentran perturbados (por deforestación, incendios forestales o brotes de plagas) y, preferentemente, no reemplazando rodales naturales que aún se encuentren sanos.

En las especies y regiones analizadas en el presente trabajo, el movimiento de fuentes de semilla a sitio de destino en las reforestaciones es plausible, toda vez que aún se cuenta con sitios suficientemente elevados en altitud, para lograr al menos cierto grado de reacoplamiento a los climas futuros. Hay otros casos mucho más difíciles, como lo es *Picea mexicana* Martínez, donde la mejor opción sería una migración asistida transcontinental para salvarla de la extinción (Mendoza-Maya et al., 2022).

Limitaciones de la propuesta de zonificación climática

Si bien el uso de la zonificación climática contemporánea y futura contribuirá a la disminución de los riesgos de inadaptación de las plántulas y, posteriormente, de los árboles adultos a los climas futuros, existen otros factores que podrían influir en el éxito de las reforestaciones; por ejemplo, la disponibilidad de semillas viables en cantidades suficientes para la reforestación de las áreas

(Madison, Wisconsin, USA), the North American Forest Commission, with funds from the International Projects of the US-Forest Service (Washington, DC; Projects IPC0.017.0635.001 and IPC0.017.1045.001), and from the Natural Resources Canada-Canadian Forest Service (Project 3000770810), and to the Coordination of Scientific Research of the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, for funding CSR. To Neyra Sosa-Gutiérrez, Ernesto Moreno-Herrejón, and technicians and beneficiaries of the 'Sembrando Vida' Program for facilitating access to their plots. To María Camila Latorre-Cárdenas and Antonio González-Rodríguez (Institute of Ecosystems and Sustainability Research, UNAM campus Morelia) for the 2023 raster layer of temperate forest vegetation. To the National Forestry Commission (CONAFOR) for providing information from the National Forest and Soil Inventory.

End of English version

References / Referencias

- Estudillo-Sánchez, C. C., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A. R., Nava-Bernal, G. E., & Gómez-Albores, M. Á. (2017). Influencia climática en el reclutamiento de *Pinus hartwegii* Lindl. del ecotono bosque-pastizal alpino en Monte Tláloc, México. *Agrociencia*, 51(1), 105–118. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v51n1/1405-3195-agro-51-01-00105.pdf>
- Bower, A. D., Clair, J. B. S., & Erickson, V. (2014). Generalized provisional seed zones for native plants. *Ecological Applications*, 24(5), 913–919. <https://doi.org/10.1890/13-0285.1>
- Carbajal-Navarro, A., 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. & Sáenz-Romero, C. (2019). Ecological restoration of *Abies religiosa* forests using nurse plants and assisted migration in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7(Article 421), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00421>
- Castellanos-Acuña, D., Lindig-Cisneros, R. A., Silva-Farias, M. Á., & Sáenz-Romero, C. (2014). Zonificación altitudinal provisional de *Abies religiosa* en un área cercana a la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca, Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(2), 215–225. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.11.041>
- Castellanos-Acuña, D., Lindig-Cisneros, R., & Sáenz-Romero, C. (2015). Altitudinal assisted migration of Mexican pines as an adaptation to climate change. *Ecosphere*, 6(1), 1–16. <https://doi.org/10.1890/ES14-00375.1>
- Castellanos-Acuña, D., Vance-Borland, K. W., St. Clair, J. B., Hamann, A., López-Upton, J., Gómez-Pineda, E., Ortega-Rodríguez, J. M., & Sáenz-Romero, C. (2018). Climate-based seed zones for Mexico: guiding reforestation under observed and projected climate change. *New Forests*, 49, 297–309. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9620-6>
- prioritarias, calidad de la planta producida en vivero, fecha de plantación, competencia entre la especie plantada y las existentes en el sitio de destino, y las condiciones del suelo, exposición y grado de pendiente. Estos factores podrían disminuir la sobrevivencia esperada; por ello, es indispensable que, además de la zonificación propuesta para decidir fuente de semilla y sitio de destino, se cuente con la experiencia de forestales, biólogos y actores locales que contribuyan a valorar si el sitio de plantación tiene las condiciones de suelo y vegetación compatibles con la especie y procedencia seleccionada para reforestación.

Conclusiones

El clima está causando desacoplamiento entre el sitio ocupado por las poblaciones de especies forestales y la ubicación del clima para el cual se han adaptado. Esto genera la necesidad de un manejo de los recursos genéticos forestales más proactivo, encaminado a lograr de nuevo el acoplamiento. Se recomienda trasladar fuentes de semillas de lugares más cálidos y secos a sitios de plantación actualmente más húmedos y fríos (en promedio 3 °C más fríos), con el fin de compensar el cambio climático que ya ha ocurrido y que se espera continúe durante las próximas décadas. Para facilitar tal decisión, se propone el uso de una zonificación climática (intervalos de 3 °C y un índice de aridez de intervalo variable), en la cual la fuente de semillas bajo clima contemporáneo (1961-1990) pertenezca a la misma zona climática que el sitio a reforestar, considerando un escenario futuro (RCP 4.5, año 2050).

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo de becas de posdoctorado al primer autor (CVU 469568) y a AGZC (CVU 550990), beca de postgrado a JLGZ (beca 815176), y al programa IIXM (Investigadoras e Investigadores por México) por el financiamiento a VOV. A la DGAPA-UNAM por beca postdoctoral a EGP. Al Monarch Butterfly Fund (Madison, Wisconsin, USA), la Comisión Forestal de América del Norte, con fondos del International Projects del US-Forest Service (Washington, DC) a través de METI (Proyectos IPC0.017.0635.001 y IPC0.017.1045.001) y del Natural Resources Canada-Canadian Forest Service (Proyecto 3000770810) y a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por financiamiento a CSR. A Neyra Sosa-Gutiérrez, Ernesto Moreno-Herrejón y técnicos y beneficiarios del Programa 'Sembrando Vida' por facilitar el acceso a sus parcelas. A María Camila Latorre-Cárdenas y Antonio González-Rodríguez (Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, UNAM campus Morelia) por la capa ráster 2023 de la vegetación de bosques

- Castro, J., Morales-Rueda, F., Navarro, F. B., Löf, M., Vacchiano, G., & Alcaraz-Segura, D. (2021). Precision restoration: A necessary approach to foster forest recovery in the 21st century. *Restoration Ecology*, 29(7), e13421. <https://doi.org/10.1111/rec.13421>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2018). *Libro Blanco. Programa Nacional Forestal (PRONAFOR)*. [http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/1/7625Programa%20Nacional%20Forestal%202014-2018\(PRONAFOR\).pdf](http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/1/7625Programa%20Nacional%20Forestal%202014-2018(PRONAFOR).pdf)
- Crow, T. M., Albeke, S. E., Buerkle, C. A., Hufford, K. M. (2018). Provisional methods to guide species-specific seed transfer in ecological restoration. *Ecosphere*, 9(1), e02059. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2059>
- de Azcárate Cornide, J. G., Ramírez, M. I., & Pinto, M. (2003). Las comunidades vegetales de la Sierra de Anganguo (Estados de Michoacán y México, México): clasificación, composición y distribución. *Lazaroa*, 24, 87–111. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1028620>
- Farjon, A., & Styles, B. T. (1997). *Pinus* (Pinaceae). *Flora Neotropica Monograph*, 75. New York Botanical Garden, New York.
- Flores-Nieves, P., López-López, M. Á., Ángeles-Pérez, G., de la Isla-Serrano, M. D. L., & Calva-Vásquez, G. (2011). Biomass estimation and distribution models of *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham: In decline. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(8), 9–20. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v2n8/v2n8a2.pdf>
- Gallardo-Salazar, J. L., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Blanco-García, A., & Osuna-Vallejo, V. (2023). Evaluation of forestry component survival in plots of the program “Sembrando Vida” (Sowing Life) using drones. *Forests*, 14(11), 2117. <https://doi.org/10.3390/f14112117>
- Giencke, L. M., Carol Denhof, R., Katherine Kirkman, L., Stribling Stuber, O., & Brantley, S. T. (2018). Seed sourcing for longleaf pine ground cover restoration: using plant performance to assess seed transfer zones and home-site advantage. *Restoration Ecology*, 26(6), 1127–1136. <https://doi.org/10.1111/rec.12673>
- 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. (2020). Suitable climatic habitat changes for Mexican conifers along altitudinal gradients under climatic change scenarios. *Ecological Applications*, 30(2), e02041. <https://doi.org/10.1002/eap.2041>
- Gutiérrez, E., & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179–188.
- Gray L. K., & Hamann, A. (2013). Tracking suitable habitat for tree populations under climate change in western North America. *Climatic Change*, 117(1-2), 289–303. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0548-8>
- Hall, M., Guerrero, G., & Masera, O. (2015). *Apéndice 2: Modelación de líneas base de deforestación utilizando GEOMOD para las regiones de Calakmul y Meseta Purépecha en México*. [https://www.researchgate.net/profile/Omar-Masera/publication/268377461_Apendice_2_Modelacion_de_lineas_](https://www.researchgate.net/profile/Omar-Masera/publication/268377461_Apendice_2_Modelacion_de_lineas_templados.A_la_Comision_Nacional_Forestal_(CONAFOR)_por_la_informacion_proporcionada_del_Inventario_Nacional_Forestal_y_de_Suelos)
- templados. A la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) por la información proporcionada del Inventario Nacional Forestal y de Suelos.
- Fin de la versión en español**
- base_de_deforestacion_utilizando_GEOMOD_para_las_regiones_de_Calakmul_y_Meseta_Purepecha_en_Mexico/links/550c5a050cf212874160db4a/Apendice-2-Modelacion-de-lineas-base-de-deforestacion-utilizando-GEOMOD-para-las-regiones-de-Calakmul-y-Meseta-Purepecha-en-Mexico.pdf
- Hansen, J., Sato, M., & Ruedy, R. (2012). Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(37), E2415-E2423. <https://doi.org/10.1073/pnas.1205276109>
- Hamann, A., Gylander, T., & Chen, P. Y. (2011). Developing seed zones and transfer guidelines with multivariate regression trees. *Tree Genetics & Genomes*, 7, 399–408. <https://doi.org/10.1007/s11295-010-0341-7>
- Hammond, W. M., Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Adams, H. D., Klein, T., López, R., Sáenz-Romero, C., Hartmann, H., Breshears D. D., & Allen, C. D. (2022). Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth’s forests. *Nature Communications*, 13(1), 1761. <https://doi.org/10.1038/S41467-022-29289-2>
- Havens, K., Vitt, P., Still, S., Kramer, A. T., Fant, J. B., & Schatz, K. (2015). Seed sourcing for restoration in an era of climate change. *Natural Areas Journal*, 35(1), 122–133. <https://doi.org/10.3375/043.035.0116>
- Ipinya, C. R., & Gutiérrez, C. B. (2014). Consideraciones genéticas para la restauración ecológica. *Ciencia & Investigación Forestal*, 20(2), 51–72. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2014.421>
- Latorre-Cárdenas, M. C., González-Rodríguez, A., Godínez-Gómez, O., Arima, E. Y., Young, K. R., Denvir, A., García-Oliva, F., & Ghilardi, A. (2023). Estimating fragmentation and connectivity patterns of the temperate forest in an avocado-dominated landscape to propose conservation strategies. *Land*, 12(3), 631. <https://doi.org/10.3390/land12030631>
- Leites, L. P., Rehfeldt, G. E., Robinson, A. P., Crookston, N. L., & Jaquish, B. (2012a). Possibilities and limitations of using historic provenance tests to infer forest species growth responses to climate change. *Natural Resource Modeling*, 25(3), 409–433. <https://doi.org/10.1111/j.1939-7445.2012.00129.x>
- Leites, L. P., Robinson, A. P., Rehfeldt, G. E., Marshall, J. D., & Crookston, N. L. (2012b). Height-growth response to climatic changes differs among populations of Douglas-fir: a novel analysis of historic data. *Ecological Applications*, 22(1), 154–165. <https://doi.org/10.1890/11-0150.1>
- López-Toledo, L., Heredia-Hernández, M., Castellanos-Acuña, D., Blanco-García, A., & Sáenz-Romero, C. (2017). Reproductive investment of *Pinus pseudostrobus* along an altitudinal gradient in Western Mexico: implications of climate change. *New Forests*, 48(6), 867–881. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9602-8>
- Madrigal-Sánchez, X. (1967). *Contribución al conocimiento de la ecología de los bosques de oyamel (Abies religiosa (H. B. K.) Schl. et Cham.) en el Valle de México*. Instituto Nacional de Investigaciones

- Forestales. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300590737>
- Mátyás, C., (2010). Forecasts needed for retreating forests. *Nature*, 464(7293), 1271. <https://www.nature.com/articles/4641271a>
- Mendoza-Maya, E., Gómez-Pineda, E., Sáenz-Romero, C., Hernández-Díaz, J. C., López-Sánchez, C. A., Vargas-Hernández, J. J., Prieto-Ruiz, J. A., & Wehenkel, C. (2022). Assisted migration and the rare endemic plant species: the case of two endangered Mexican spruces. *PeerJ*, 10, e13812. <https://doi.org/10.7717/peerj.13812>
- Molina Sánchez, A., Delgado, P., González-Rodríguez, A., González, C., Gómez-Tagle Rojas, A. F., & Lopez-Toledo, L. (2019). Spatio-temporal approach for identification of critical conservation areas: a case study with two pine species from a threatened temperate forest in Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 28(7), 1863 – 1883. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01767-y>
- Ortiz-Bibian, M. A., Blanco-García, A., Lindig-Cisneros, R. A., Gómez-Romero, M., Castellanos-Acuña, D., Herrerías-Diego, Y., Sánchez-Vargas, N. M., & Sáenz-Romero, C. (2017). Genetic variation in *Abies religiosa* for quantitative traits and delineation of elevational and climatic zoning for maintaining monarch butterfly overwintering sites in Mexico, considering climatic change. *Silvae Genetica*, 66(1), 14 – 23. <https://doi.org/10.1515/sg-2017-0003>
- O'Neill, G. A., Stoehr, M., & Jaquish, B. (2014). Quantifying safe seed transfer distance and impacts of tree breeding on adaptation. *Forest Ecology and Management*, 328, 122 – 130. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.039>
- Pike, C., Potter, K. M., Berrang, P., Crane, B., Baggs, J., Leites, L., & Luther, T. (2020). New seed-collection zones for the eastern United States: the eastern seed zone forum. *Journal of Forestry*, 118(4), 444 – 451. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvaa013>
- Prieto Ruiz, J. Á., Duarte Santos, A., Goche Télles, J. R., González Orozco, M. M., & Pulgarín Gámiz, M. Á. (2018). Supervivencia y crecimiento de dos especies forestales, con base en la morfología inicial al plantarse. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 151 – 168. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.182>
- Prieto Ruiz, J. A., & Goche Télles, R. (2016). *Las reforestaciones en México: problemática y alternativas de solución* (1^a ed.). Universidad Juárez Autónoma de Durango. http://forestales.ujed.mx/forestales/es/contenido/eventos_documentos/LIBRO_REFORESTACIONES_EN_MEXICO.pdf
- QGIS (2023). *QGIS Geographic Information System. Un sistema de información geográfica libre y de código abierto versión 3.32.1*. <http://www.qgis.org>
- Rehfeldt, G. E., & Jaquish, B. C. (2010). Ecological impacts and management strategies for western larch in the face of climate-change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15(3), 283 – 306. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9217-2>
- Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Sáenz-Romero, C., & Campbell, E. M. (2012). North American vegetation model for land-use planning in a changing climate: A solution to large classification problems. *Ecological Applications*, 22(1), 119 – 141. <https://doi.org/10.1890/11-0495.1>
- Rehfeldt, G. E., Leites, L. P., St Clair, J. B., Jaquish, B. C., Sáenz-Romero, C., López-Upton, J., & Joyce, D. G. (2014). Comparative genetic responses to climate in the varieties of *Pinus ponderosa* and *Pseudotsuga menziesii*: Clines in growth potential. *Forest Ecology and Management*, 324, 138 – 146. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.02.041>
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J., & Richardson, B. A. (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, G. E., Duval, P., & Lindig-Cisneros, R. A. (2012a). *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>
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Soto-Correa, J. C., Aguilar-Aguilar, S., Zamarripa-Morales, V., & López-Upton, J. (2012b). Altitudinal genetic variation among *Pinus pseudostrobus* populations from Michoacán, México: two location shadehouse test results. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(2), 111 – 121. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v35n2/v35n2a3.pdf>
- Sáenz-Romero, C. S. (2015). Efectos potenciales del cambio climático en los recursos forestales. La sabanización de las regiones continentales de México. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 15(30), 91 – 110. <https://sociedadesruralesojs.xoc.uam.mx/index.php/srpm/article/view/291/289>
- Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Joyce, D. G., Beaulieu, J., Bradley, J. St. C., & Jaquish, B. C. (2016). Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 303 – 323. <https://doi.org/10.51514/r.rchscfa.2014.10.052>
- Sáenz-Romero, C., Mendoza-Maya, E., Gómez-Pineda, E., Blanco-García, A., Endara-Agramont, A. R., Lindig-Cisneros, R., López-Upton, J., Trejo-Ramírez, O., Wehenkel, C., Cibrián-Tovar, D., Flores-López, C., Plascencia-González, A., & Vargas-Hernández, J. J. (2020). Recent evidence of Mexican temperate forest decline and the need for ex situ conservation, assisted migration, and translocation of species ensembles as adaptive management to face projected climatic change impacts in a megadiverse country. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(9), 843 – 854. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0329>
- Sáenz-Romero, C., Cambrón-Sandoval, V. H., Hammond, W., Méndez-González, J., Luna-Soria, H., Macías-Sámano, J. E., Gómez-Romero, M., Trejo-Ramírez, O., Allen, C. D., Gómez-Pineda, E., & Del-Val, E. (2023). Abundance of *Dendroctonus frontalis* and *D. mexicanus* (Coleoptera: Scolytinae) along altitudinal transects in Mexico: Implications of climatic change for forest conservation. *PLoS ONE*, 18(7), e0288067. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288067>
- Sáenz-Romero, C. (2024). Arriving at a tipping point for worldwide forest decline due to accelerating climatic change. *The Forestry Chronicle*, 100(1), 1 – 3 <https://doi.org/10.5558/tfc2024-003>
- Seda, A. & Ömer, Ö. (2019). Present and future potential distribution of the *Pinus nigra* Arnold. and *Pinus sylvestris* using Maxent

- model. *International Journal of Ecosystems and Ecology Sciences*, 9(4). <https://doi.org/10.31407/ijees9425>
- Secretaría de Economía. (2016). *Declaratoria de vigencia de la Norma Mexicana NMX-AA-169-SCFI-2016. Establecimiento de unidades productoras y manejo de germoplasma forestal especificaciones técnicas*. México: Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5455455&fecha=03/10/2016#gsc.tab=0
- St. Clair, J. B., Kilkenny, F. F., Johnson, R. C., Shaw, N. L., & Weaver, G. (2013). Genetic variation in adaptive traits and seed transfer zones for *Pseudoroegneria spicata* (bluebunch wheatgrass) in the northwestern United States. *Evolutionary Applications*, 6(6), 933–948. <https://doi.org/10.1111/eva.12077>
- Soni, D. K., & Ansari, F. (2017). Climate change and biodiversity: impacts, vulnerability and mitigation in Indian perspective: A review. *Journal of Applied and Natural Science*, 9(1), 632–638. <https://journals.ansfoundation.org/index.php/jans/article/view/1243/1194>
- Tomita, M., Kobayashi, S., Abe, S., Hanai, T., Kawazu, K., & Tsuda, S. (2017). Phylogeography of ten native herbaceous species in the temperate region of Japan: implication for the establishment of seed transfer zones for revegetation materials. *Landscape and Ecological Engineering*, 13, 33–44. <https://doi.org/10.1007/s11355-016-0297-3>
- Tchebakova, N. M., Rehteldt, G. E., & Parfenova E. I. (2005). Impacts of climate change on the distribution of *Larix* spp. and *Pinus sylvestris* and their climatotypes in Siberia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 861–882. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9019-0>
- Urban, M. C. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, 348(6234), 571–573. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4984>
- Walsh, J., Wuebbles, D., Hayhoe, K., Kunkel, K., Somerville, R., Stephens, G., & Thorne, P. (2013). Our changing climate. *NCADAC Draft Climate Assessment Report*, 25–103. <https://doi.org/10.7930/J0KW5CXT>
- Wang, T., Hamann, A., Spittlehouse, D., & Carroll, C. (2016). Locally downscaled and spatially customizable climate data for historical and future periods for North America. *PLoS ONE*, 11(6), e0156720. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156720>