

Zonificación municipal para movimiento de germoplasma forestal, frutícola y agrícola como adaptación al cambio climático

Municipal zoning for movement of forest, fruit and agricultural germplasm to adapt to climate change

Gyorgy Eduardo Manzanilla-Quijada^{1*} , Cuauhtémoc Sáenz-Romero¹ , Erika Gómez-Pineda² , Roberto Lindig-Cisneros³ 

¹Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (INIRENA-UMSNH). Av. San Juanito Itzicuaró, s/n, Col. Nueva Esperanza, C.P. (58337). Morelia, Michoacán, México.

²Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, (CIGA-UNAM). Antigua Carretera a Pátzcuaro, No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta. C.P. (58190). Morelia, Michoacán, México.

³Laboratorio de Restauración Ambiental, Centro de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, (IIES-UNAM). Antigua Carretera a Pátzcuaro, No.8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, C.P. (58190), Morelia, Michoacán, México.

*Autor de correspondencia: gmanzanilla_quijada@hotmail.com

Nota científica

Recibida: 6 de mayo de 2024

Aceptada: 11 de septiembre de 2024

RESUMEN. La reforestación y establecimiento de cultivos es cada vez más compleja y desafiante en el contexto del cambio climático. El objetivo fue definir zonas de colecta y lineamientos para decidir transferencia de semillas en siete municipios de seis estados de México para guiar la reforestación y el establecimiento de cultivos agrícolas-frutícolas del Programa Interinstitucional de Especialidad en Soberanías Alimentarias y Gestión de Incidencia Local Estratégica (PIES-AGILES) como medida de adaptación al cambio climático. Se generaron mapas para siete municipios del centro y sureste del país, para guiar la colecta y movimiento de germoplasma bajo un clima de referencia (1961-1990), y para climas futuros: 2025 escenario RCP 8.5 para cultivos agrícolas-frutícolas, y 2 050 escenario RCP 4.5 para especies forestales. Se recomienda trasladar las fuentes de semillas de lugares a 3 °C más cálidos y secos a sitios de plantación a más húmedos y fríos, para compensar el cambio climático.

Palabras clave: Calentamiento global, temperatura, transferencia de semilleras, recolección de semillas, precipitación, zonificación climática.

ABSTRACT. Reforestation and crop establishment in a changing environment becomes increasingly complex and challenging in the context of climate change. The objective of this study was to define seed collection and guidelines for deciding seed transfer in seven municipalities within six Mexican states to guide reforestation and the establishment of agricultural-fruit crops of the Interinstitutional Program of Specialization in Food Sovereignty and Strategic Local Impact Management (PIES-AGILES, by its Spanish acronym) as a measure of adaptation to climate change. Maps were generated for seven municipalities located in the center and southeast of the country, to guide germplasm collection and movement under a reference climate (1961-1990), and for future climates: 2025 scenario RCP 8.5 for agricultural-fruit crops, and 2050 scenario RCP 4.5 for forest species. It is recommended to move seed sources from 3 °C warmer and drier places to currently cooler and more humid planting sites, to compensate for the climate change.

Keywords: Climate zoning, global warming, temperature, seedbed transfer, precipitation, seed collection.

Como citar: Manzanilla-Quijada GE, Sáenz-Romero C, Gómez-Pineda E, Lindig-Cisneros R (2025) Zonificación municipal para movimiento de germoplasma forestal, frutícola y agrícola como adaptación al cambio climático. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 12(1): e4173. DOI: 10.19136/era.a12n1.4173.

INTRODUCCIÓN

El Programa Interinstitucional de Especialidad en Soberanías Alimentarias y Gestión de Incidencia Local Estratégica (PIES AGILES), es una propuesta de formación educativa para la incidencia social en los territorios y sus comunidades, utilizando la metodología de investigación de acción participativa para construir planes de acción comunitarios que respondan a las preguntas y necesidades de cada comunidad. PIES-AGILES fortalece los procesos comunitarios hacia la soberanía alimentaria, las transiciones agroecológicas y la eliminación gradual del uso del glifosato y otros agentes tóxicos en el campo mexicano, así como establecer alianzas con actores clave que compartan estos propósitos del proyecto. Sin embargo, los potenciales impactos negativos del cambio climático sobre los sistemas productivos han cobrado mayor relevancia en los últimos años, dadas las pruebas irrefutables de que el clima está cambiando al aumentar la temperatura y alterar los patrones de precipitación (Masson-Delmotte *et al.* 2022). Los responsables de tomar decisiones en materia de política pública, los silvicultores y la sociedad en general están convencidos de que el cambio climático es un hecho al que hay que hacer frente (Pralle 2013). La magnitud de estos cambios ha sido proyectada para México: donde se prevé un incremento en la temperatura media anual de +1.5 °C para 2030, +2.3 °C para 2060 y +3.7 °C para 2090, acompañado de un decremento en la precipitación de hasta 28% en comparación al promedio del periodo de referencia 1961-1990 (Sáenz-Romero *et al.* 2010). Sin embargo, a escala global es probable que se alcance un aumento de la temperatura media anual de 1.5 °C entre 2030 y 2040, y una disminución de las precipitaciones de hasta el 30% en muchas regiones del mundo (IPCC 2018, Allen *et al.* 2018, Hansen *et al.* 2019). El aumento en la temperatura y disminución en la precipitación conducirán al desacoplamiento entre las poblaciones forestales/cultivos agrícolas-frutícolas y el clima de los sitios que ocupan, los cuales serán cada vez más secos y calientes, sometiendo a los árboles y cultivos a un estrés por sequía que puede llegar a causar una significativa mortalidad y/o reducir en gran medida sus tasas de crecimiento, y con ello disminuir el rendimiento de los cultivos (Hammond *et al.* 2022). Para asegurar que en un futuro se tengan árboles y cultivos adaptados al clima al cual se adaptaron a través de un largo proceso evolutivo y/o de domesticación, es necesario predecir dónde y cuándo ocurrirá dicho clima e incorporar medida de manejo que busquen reacoplar las poblaciones/cultivos a los nuevos ambientes generados por el calentamiento global (Castellanos-Acuña *et al.* 2018).

Las zonas de movimiento de germoplasma juegan un papel clave para mitigar los problemas de adaptación de las plantas en los sitios establecidos en los diferentes programas de reforestación (Pike *et al.* 2020, Smith *et al.* 2021, Núñez-Piedra *et al.* 2023). Sin embargo, los cultivos agrícolas-frutícolas no están exentos de ser alterados por el cambio climático, por lo que algunas especies deberán moverse hacia ciertas áreas en donde se prevé que ocurra su clima propicio en un futuro cercano (Waha *et al.* 2012, Minoli *et al.* 2022). También es deseable implementar estrategias de adaptación de bajo costo como la modificación de fechas de siembra, cambio de variedades, entre otras (López-Feldman y Hernández-Cortés 2016). Este movimiento de germoplasma consiste en la recolección de semillas para producir plántulas en vivero y realizar reforestaciones en los sitios donde se prevé clima propicio (Castellanos-Acuña *et al.* 2015, Sáenz-Romero *et al.* 2016, Manzanilla-Quijada *et al.* 2024). De acuerdo con Kramer y Havens (2009), y St. Clair *et al.* (2013), así como Havens *et al.* (2015), las zonas de recolección de semillas (ZRS) se designan superponiendo alguna

combinación de variables climáticas y delimitando áreas comunes como una zona de recolección de semillas en donde se distribuye la especie de interés, para producir planta en vivero y plantarla en áreas donde exista un clima adecuado para su desarrollo. Las zonas de transferencia de semillas (ZTS) son áreas geográficas dentro de las cuales el germoplasma de una población nativa puede ser trasladado considerando condiciones (presentes o futuras) similares a los del origen de las ZRS, para disminuir los riesgos mínimos de mala adaptación, considerando el clima futuro (Kramer y Havens 2009, Havens *et al.* 2015). El objetivo del estudio fue proporcionar información que ayude a guiar la reforestación con especies forestales y el establecimiento de cultivos agrícolas-frutícolas considerando cambio climático. Con esto se contribuye a fortalecer los Planes de Acción Comunitaria de siete comunidades de aprendizaje PIES AGILES, para quienes el tema de la adaptación al cambio climático es de gran relevancia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis de series de tiempo

Para estimar la magnitud del cambio climático respecto al incremento de temperatura para las próximas décadas, se realizaron análisis de series temporales de la temperatura media anual (TMA) del período (1961-1990), (2011-2040) y (2041-2070), correspondientes al clima contemporáneo del año 1975, y futuro 2025 RCP 8.5, 2050 RCP 4.5, utilizando las coordenadas y elevación (altitud) de cada uno de los municipios (Tepetzotlán, Estado de México, altitud: 2 800 m; Tlalpujahua, Michoacán, altitud: 2 070 m; Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, altitud: 2 000 m; Poncitlán, Jalisco, altitud: 2 100 m; Tepoztlán, Morelos, altitud: 2 600 m; Huatusco, Veracruz, altitud: 1 800 m; y Escárcega, Campeche, Altitud: 100 m) con el programa ClimateNA (Wang *et al.* 2016).

Elaboración de mapas de zonas de colecta y transferencia de semillas

Se generaron mapas que muestran las ZRS y las ZTS en los municipios de Tepetzotlán, Estado de México; Tlalpujahua, Michoacán; Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco; Poncitlán, Jalisco; Tepoztlán, Morelos; Huatusco, Veracruz; Escárcega, Campeche, en donde se está aplicando el programa PIES-AGILES.

La información utilizada para generar los mapas de zonas de colecta y transferencia de semillas se basó en una zonificación con criterios únicamente climáticos, proviene de Castellanos-Acuña *et al.* (2018) cuyos archivos se encuentran disponibles en formato vectorial (shapefiles) en un repositorio digital de acceso abierto a todo público. La resolución espacial original de las capas es de 1 km². Sin embargo, para este trabajo la resolución se redujo a 400 x 400 m, para un mayor detalle del relieve. Estas zonas climáticas se forman a partir de la temperatura media del mes más frío (MCMT por las siglas en inglés de Mean Coldest Month Temperature) y de un índice de aridez (IA). Este último es un cociente obtenido a partir de la medida de aridez que se calcula como: (temperatura media anual + 10) / (precipitación/1000) (Bower *et al.* 2014). Los intervalos correspondientes a la MCMT se conforman a intervalos de 3 °C. Los intervalos del IA son de una magnitud no constante, pero tienen aproximadamente la misma anchura bajo una transformación logarítmica (valores más elevados indican una mayor aridez). Cabe señalar que la superposición de estas dos variables climáticas resultó en 63 zonas climáticas que delimitan las zonas semilleras (Castellanos-Acuña *et*

al. 2018). Este criterio de zonificación se utilizó para generar el mapa del escenario contemporáneo (1961-1990) y los mapas de los escenarios futuros: 2025 utilizado en RCP 8.5 para cultivos agrícolas o frutícolas, y 2050 utilizando el RCP 4.5 para especies forestales; se utilizó el programa QGIS versión 3.32.2 (QGIS Development Team 2022).

Para el caso de cultivos agrícolas o frutícolas, debido a que su ciclo de vida es mucho más corto, se pueden trasladar con menor anticipación para acoplarse a un clima futuro. Es por ello que, se requiere de una proyección de clima a un horizonte futuro más cercano; por ejemplo 2025, para acoplarse al cambio climático que ya ha ocurrido. En cambio, en el caso de las especies forestales, como su ciclo vital es mucho más largo, es necesario realizar la transferencia al sitio de destino proyectado con mucha más anticipación, a fin de compensar tanto el cambio climático que ya ha ocurrido como el que ocurrirá en las próximas décadas; por ello, en ese caso, se propone el uso de una proyección del cambio climático a 2050.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de series de tiempo

Las temperaturas medias anuales promedio (TMA) para los diferentes municipios evaluados en este estudio durante el periodo contemporáneo correspondiente al año 1975, futuro 2025 RCP 8.5 para cultivos agrícolas o frutales y 2050 RCP 4.5 para especies forestales, se muestran en la Figura 1. Es posible visualizar una tendencia en el incremento de la temperatura en cada escenario, con respecto a cada uno de los municipios, Escárcega, Campeche con una temperatura en el clima contemporáneo (periodo 1961-1990) de 26 °C, con un incremento para el año 2025 RCP 8.5 de 1.4 °C y para el año 2050 de 2.3 °C con respecto al clima actual. Es de esperarse ya que el estado de Campeche suele tener zonas más cálidas. Sin embargo, los municipios de Tlajomulco de Zúñiga; Poncitlán, Jalisco; Tlalpujahua, Michoacán; Huatusco, Veracruz se encuentran en el rango de temperatura climática contemporánea de 16 a 17.6 °C, con incrementos de temperatura para el año 2025 de 0.6 a 2.1 °C, mientras que para el año 2050 el incremento de temperatura va de 1.5 a 3 °C con respecto al clima de referencia (1961-1990). Para los municipios de Tepotzotlán, Estado de México y Tepoztlán, Morelos el rango de temperatura climática contemporánea es de 13.4 a 13.9 °C, con un incremento de 1.3 a 1.4 °C para 2025 y de 2.2 a 2.3 °C para 2050, respectivamente. México ha experimentado tasas de calentamiento de entre 2 °C y 4 °C por siglo en gran parte de su territorio entre 1975 y 2021 (Estrada *et al.* 2023). Según el informe de la organización meteorológica mundial, se prevé que cada año entre 2024 y 2028 la temperatura media cercana a la superficie del planeta en su conjunto sea entre 1.1 °C y 1.9 °C superior a la del período de referencia de 1850-1900 (WMO 2024). De nuevo, Estrada *et al.* (2023) señala que para el año 2050 se prevé un incremento en la temperatura entre 2.0 y 2.5 °C y de entre 3.83 y 5.35 °C a finales de siglo. Estos resultados indican un incremento de temperatura substancial para el 2025, que bien podría interpretarse como un proxy del cambio climático que ya ha ocurrido. La proyección del incremento de temperatura para 2050, indica que la tendencia continuará en las próximas décadas.

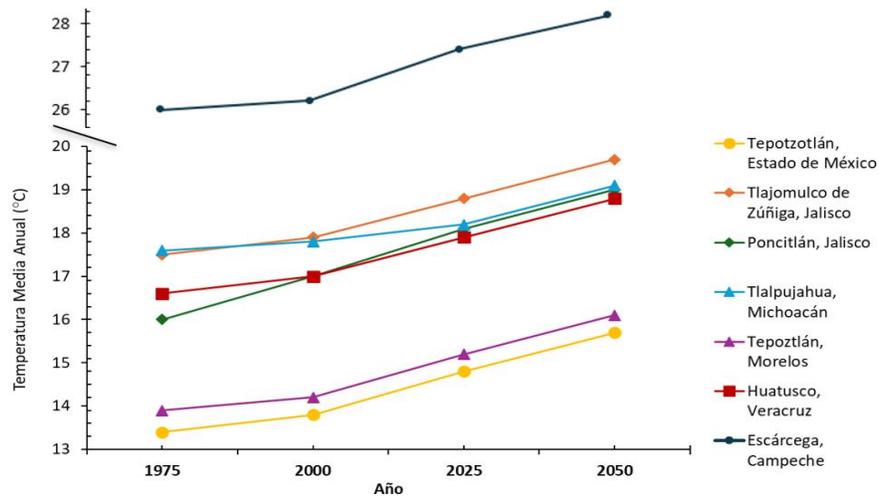


Figura 1. Series temporales de temperatura media anual (TMA) de sitios, ejemplo dentro de los municipios en donde opera el programa PIES-AGILES y que son considerados en este análisis.

Modo de uso: Zonas de colecta y transferencia de semillas

Las siguientes instrucciones son válidas tanto para especies forestales como para cultivos agrícolas-frutícolas. La serie de mapas (divididos en paneles A, B y C) muestra cómo utilizar las zonas climáticas semilleras: Primero seleccione el lugar de plantación bajo el clima de referencia (periodo 1961-1990). Ejemplo indicado con una estrella blanca (Figura 2A). A continuación, vea cuál es su zona climática que le corresponde bajo el clima contemporáneo. Después vea cuál va a ser su zona climática en el escenario futuro elegido (RCP 4.5 para la década de 2050 en este caso) (Figura 2C). Posteriormente vuelva al clima contemporáneo de referencia y buscar en dónde sucede actualmente el clima que ocurrirá en el futuro en el área a reforestar, y esa área será la zona de colecta de semilla. Es decir, la zona climática de colecta de semillas debe tener los mismos valores climáticos de temperatura y de índice de aridez que el clima que ocurrirá en el futuro en el sitio a reforestar (Castellanos-Acuña *et al.* 2018, Manzanilla-Quijada *et al.* 2024). En las figuras, se observa que las flechas rojas hacen coincidir la misma zona climática del periodo de referencia (1961-1990) respecto al futuro (2050). Esta coincidencia es la que se requiere para que las plantas estén adaptadas al futuro. Las flechas negras, en cambio, indican el movimiento de germoplasma que debemos realizar en el presente para compensar el cambio climático del sitio de colecta de semillas al sitio de plantación.

A continuación, se ejemplifica el uso de la zonificación en detalle con figuras para las especies forestales, pero la descripción de uso es válida para especies agrícolas y frutales, usando los mapas correspondientes (Década 2025 para frutales, paneles B en todas las figuras). En el ejemplo de la estrella señalada del lugar de plantación dentro de los municipios Tepotzotlán, Estado de México y Tlalpujahua, Michoacán, la zona climática 42 correspondiente al color azul claro (MTCM = 8.4 a 11.2 °C; IA = de 20 a 30; Figuras 2A y 3A), en 2050 conserva el mismo valor para IA, pero se vuelve más cálida (verde claro, MTCM = 11.2 a 14 °C, Figuras 2C y 3C). En el lugar de plantación dentro del municipio Tlajomulco de Zúñiga y Poncitlán en el estado de Jalisco, la zona climática 63 corresponde al color verde oscuro (MTCM = 11.2 a 14 °C, IA = de 30 a 45; Figuras 4A y 5A), en 2050

conserva el mismo valor para IA, pero se vuelve más cálida (amarillo claro, MTCM = 14 a 16.8 °C) (Figuras 4C y 5C). En el lugar de plantación dentro del municipio Tepoztlán, Morelos, la zona climática 41 correspondiente al color azul oscuro (MTCM = 8.4 a 11.2 °C, IA = de 0 a 20, Figura 6A), en 2050 conserva el mismo valor para IA, pero se vuelve más cálida (verde oscuro, MTCM = 11.2 a 14 °C) (Figura 6C). En el lugar de plantación dentro del municipio Huatusco, Veracruz, la zona climática 51 correspondiéndole al color verde claro (MTCM = 11.2 a 14 °C, IA = de 0 a 20, Figura 7A), en 2050 conserva el mismo valor para IA, pero se vuelve más cálida (amarillo claro, MTCM = 14 a 16.8 °C) (Figura 7C). Por último, en el lugar de plantación dentro de la región Escárcega, Campeche, la zona climática 82 de color café oscuro (MTCM = 19.6 a 22.4 °C, IA = de 20 a 30, Figura 8A), en 2050 conserva el mismo valor para IA, pero se vuelve más cálida (amarillo claro, MTCM = 19.6 a 22.4 °C) y más árido (IA = 30 a 45) (Figura 8C). De acuerdo con el mapa de vegetación de la CONAFOR (2018) la zona climática con el color azul claro, verde claro y verde oscuro comparten tipos de vegetación de bosque de pino-encino, bosque de encino, bosque de cedro. Sin embargo, la zona climática que corresponde al color amarillo claro y café oscuro se reportan selvas caducifolias, selvas bajas caducifolias, selva mediana subperennifolia entre otros tipos, es de esperarse para este tipo de climas. Cabe señalar que dentro de las zonas climáticas mencionadas con anterioridad se encuentra agricultura de temporal, pastizal inducido y superficies sin cobertura vegetal. La tendencia entre la zonificación contemporánea y la futura es el reemplazo de áreas con climas templados fríos por climas más cálidos y secos. Visualmente, esto se traduce en que sitios con climas representados en color azul oscuro, son parcialmente reemplazados por climas azul claro, y éste por verde, que a su vez es reemplazado por amarillo.

En síntesis, las zonas climáticas que antes eran más frías serán reemplazadas en el futuro por zonas climáticas con condiciones más cálidas, debido al aumento de la temperatura. Se puede observar que el clima en algunos municipios tiene zonas climáticas relativamente más frías (en colores azules) debido a que se ubican en las partes altas de las montañas. Sin embargo, para otros municipios incluyen zonas climáticas más cálidas (en colores amarillo, rosa, naranja y rojo), como el caso de los municipios que se ubican cercas de las costas y al sur de México. Tal cambio climático esperado, ya en curso, es necesario compensarlo colectando semillas de las especies de interés en zonas en promedio 3 °C más cálidas (y por tanto más secas) que los sitios en donde se deberá utilizar ese germoplasma, que actualmente son más frías y húmedas, pero que dejarán de serlo conforme avance el cambio climático. El movimiento promedio de 3 °C es el que ocurre al cruzar la frontera de una zona climática hacia una vecina más fría, toda vez que las zonas se definieron a intervalos de 3 °C de media de temperatura del mes más frío (Castellanos-Acuña *et al.* 2018). El movimiento de germoplasma aquí sugerido para los Municipios beneficiados por el programa PIES-AGILES, es similar al propuesto para sitios del programa federal Sembrando Vida en la Meseta Purépecha, Michoacán, y para la restauración ecológica (considerando cambio climático) de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, en la frontera de Michoacán y el Estado de México (Manzanilla-Quijada *et al.* 2024).

Zonas de colecta y transferencia de semillas para especies forestales, cultivos agrícolas y frutícola Tepotzotlán, Estado de México

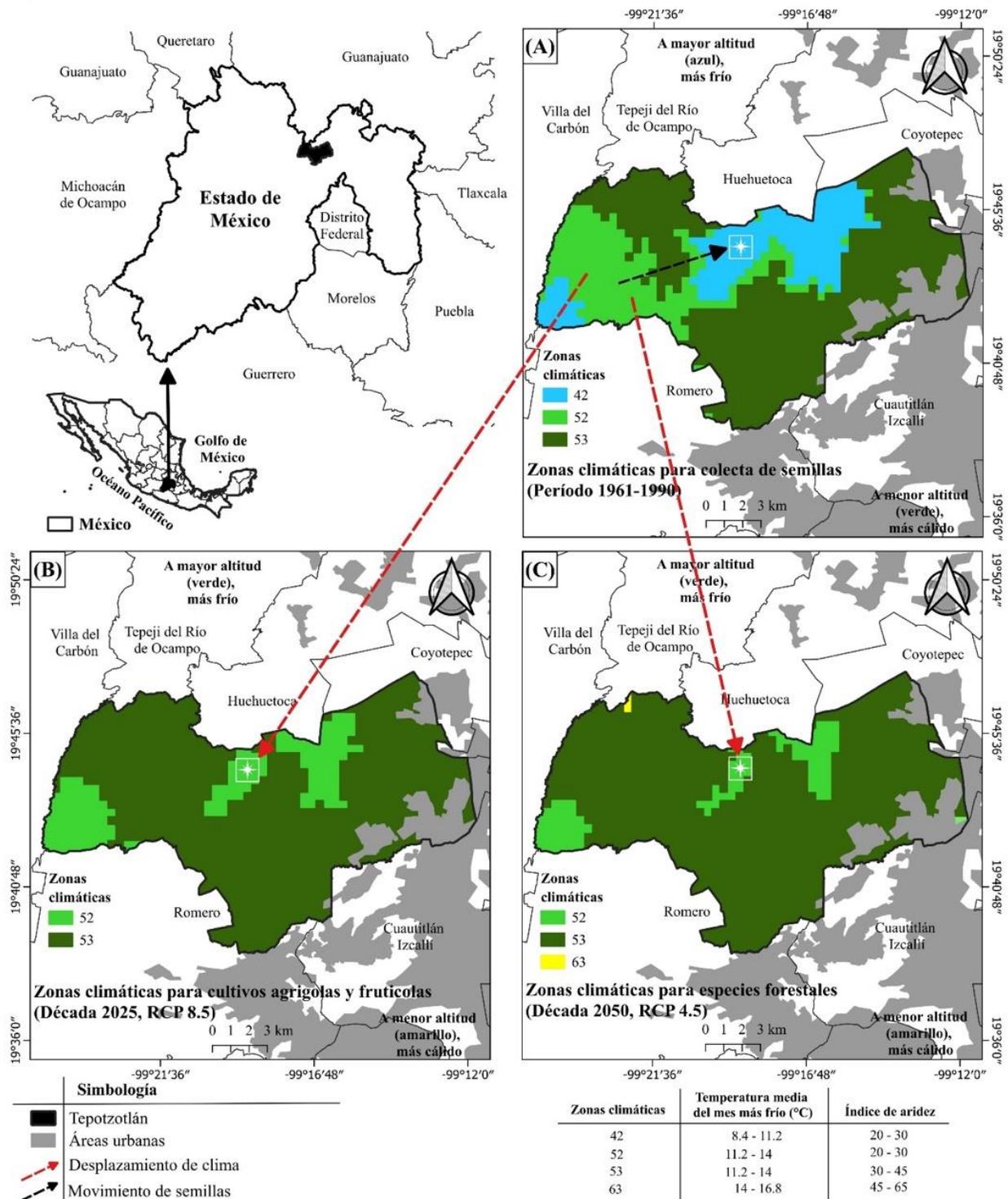


Figura 2. A) Zonas climáticas para colecta de semillas, B) Zonas climáticas para cultivos agrícolas y frutícolas, y C) Zonas climáticas para especies forestales. Tepotzotlán, Estado de México.

Zonas de colecta y transferencia de semillas para especies forestales, cultivos agrícolas y frutícola Tlalpujahua, Michoacán

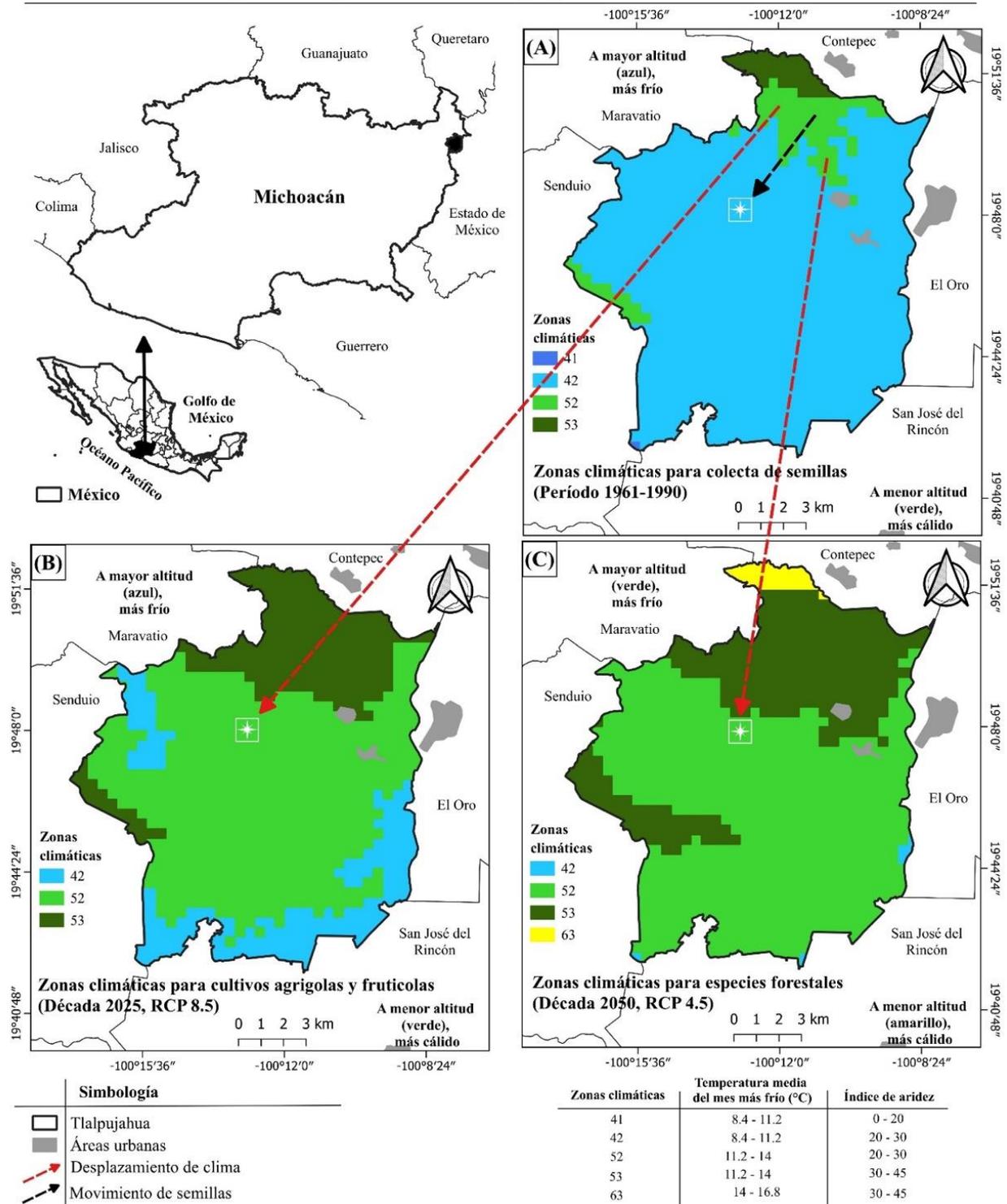


Figura 3. A) Zonas climáticas para colecta de semillas, B) Zonas climáticas para cultivos agrícolas y frutícolas, y C) Zonas climáticas para especies forestales. Tlalpujahua, Michoacán.

Zonas de colecta y transferencia de semillas para especies forestales, cultivos agrícolas y frutícola Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco

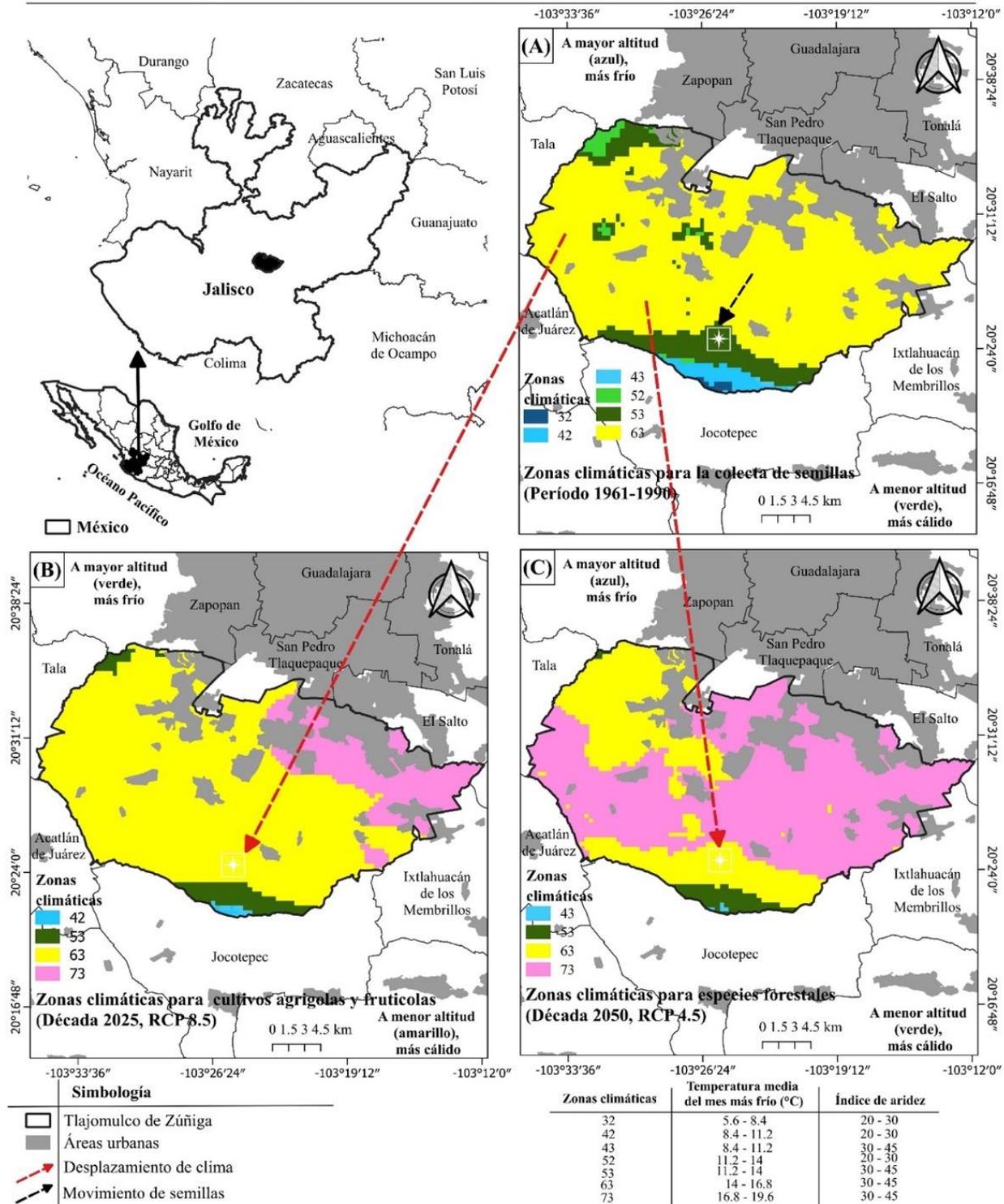


Figura 4. A) Zonas climáticas para colecta de semillas, B) Zonas climáticas para cultivos agrícolas y frutícolas, y C) Zonas climáticas para especies forestales. Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco.

Zonas de colecta y transferencia de semillas para especies forestales, cultivos agrícolas y frutícola Poncitlán, Jalisco

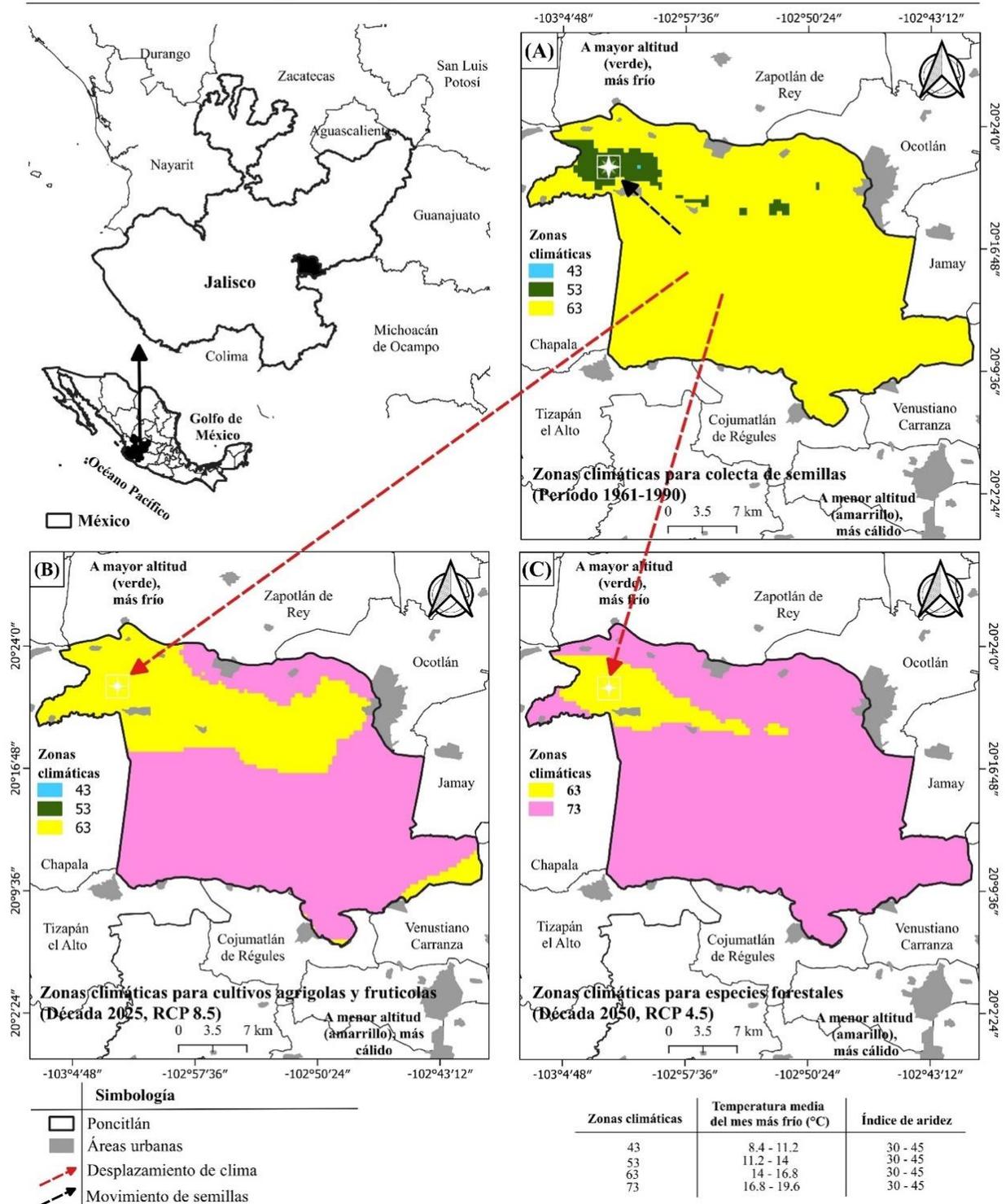


Figura 5. A) Zonas climáticas para colecta de semillas, B) Zonas climáticas para cultivos agrícolas y frutícolas, y C) Zonas climáticas para especies forestales. Poncitlán, Jalisco.

Zonas de colecta y transferencia de semillas para especies forestales, cultivos agrícolas y frutícola Tepoztlán, Morelos

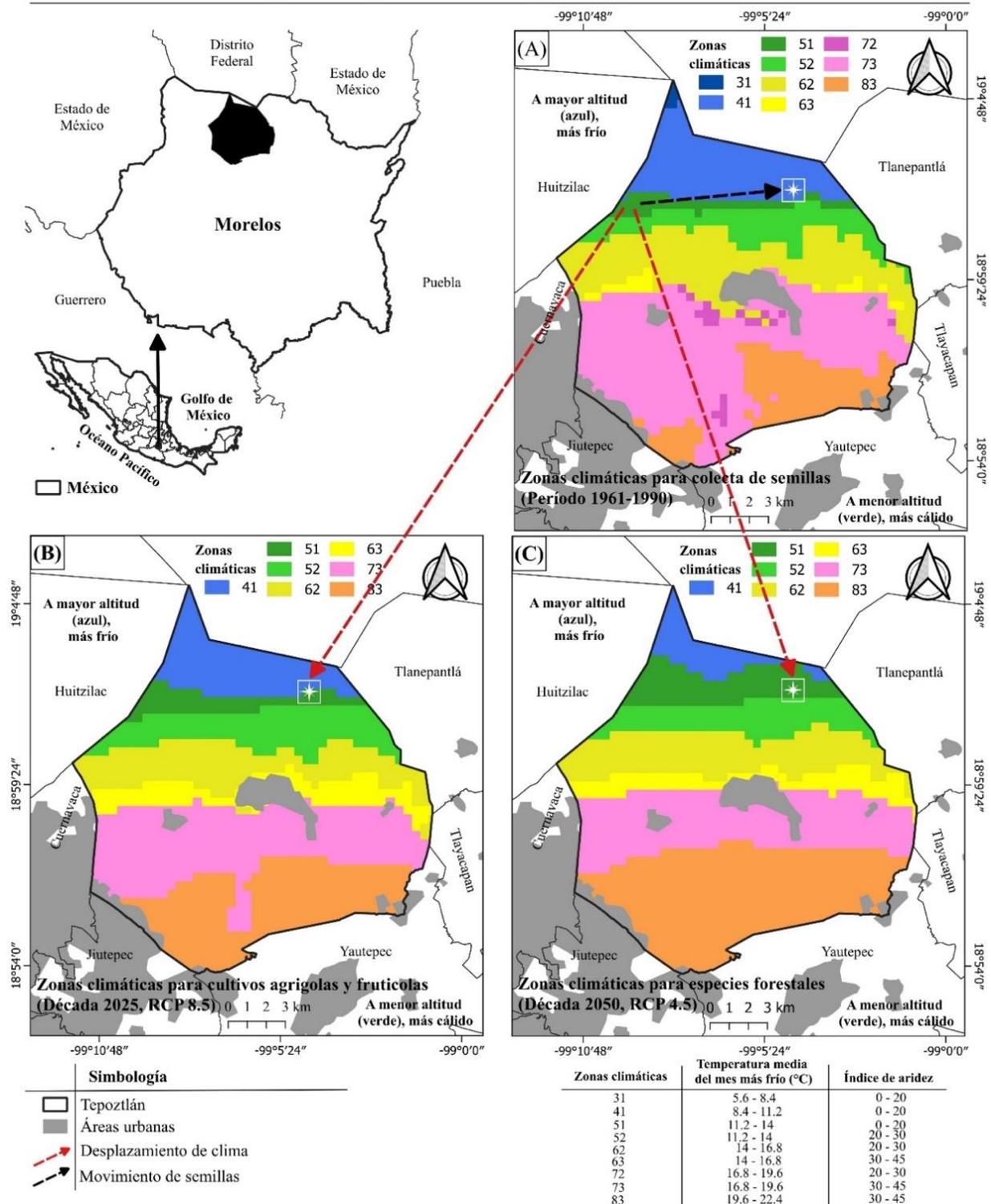


Figura 6. A) Zonas climáticas para colecta de semillas, B) Zonas climáticas para cultivos agrícolas y frutícolas, y C) Zonas climáticas para especies forestales. Tepoztlán, Morelos.

Zonas de colecta y transferencia de semillas para especies forestales, cultivos agrícolas y frutícola Huatusco, Veracruz

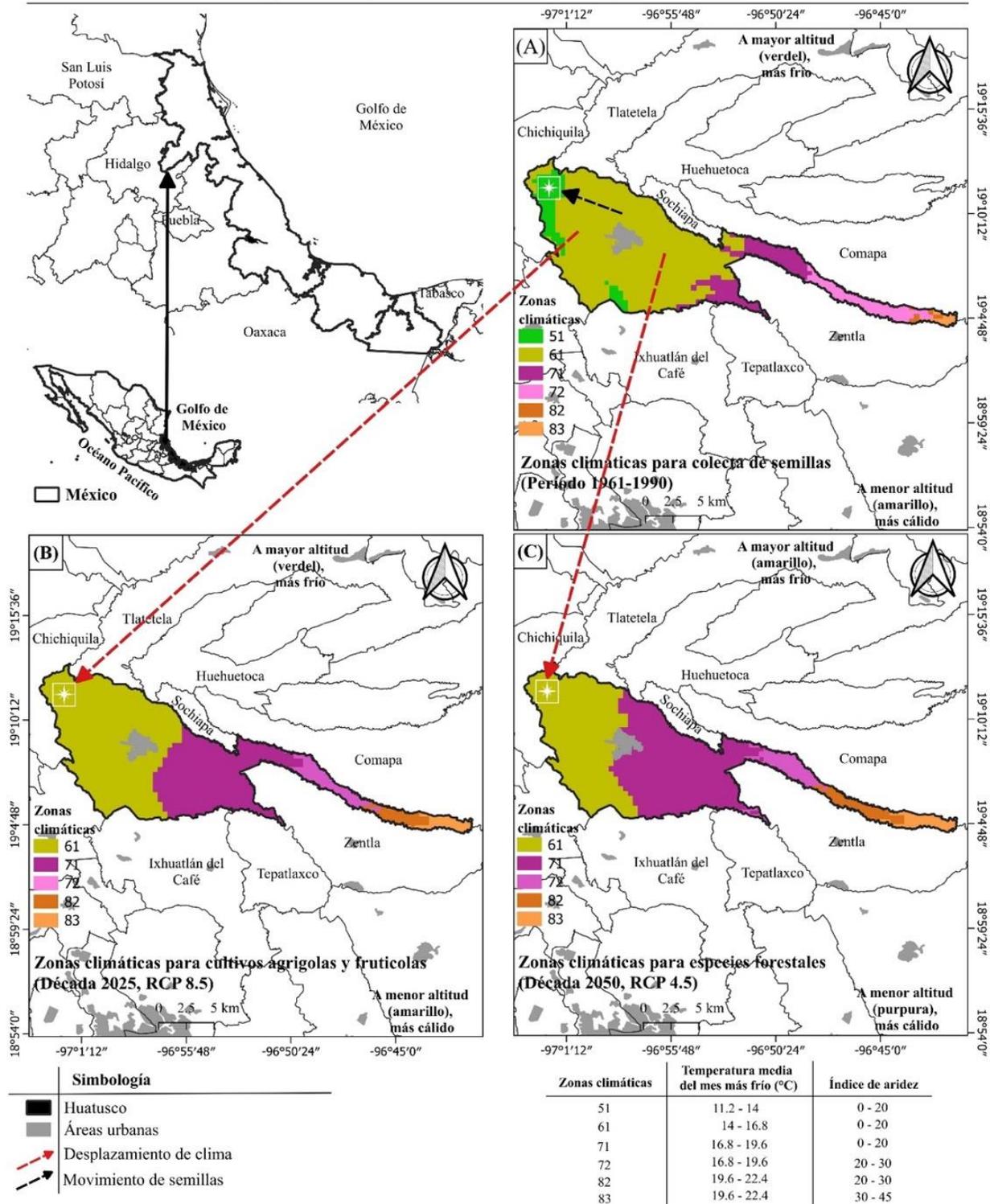


Figura 7. A) Zonas climáticas para colecta de semillas, B) Zonas climáticas para cultivos agrícolas y frutícolas, y C) Zonas climáticas para especies forestales. Huatusco, Veracruz.

Zonas de colecta y transferencia de semillas para especies forestales, cultivos agrícolas y frutícola Escárcega, Campeche

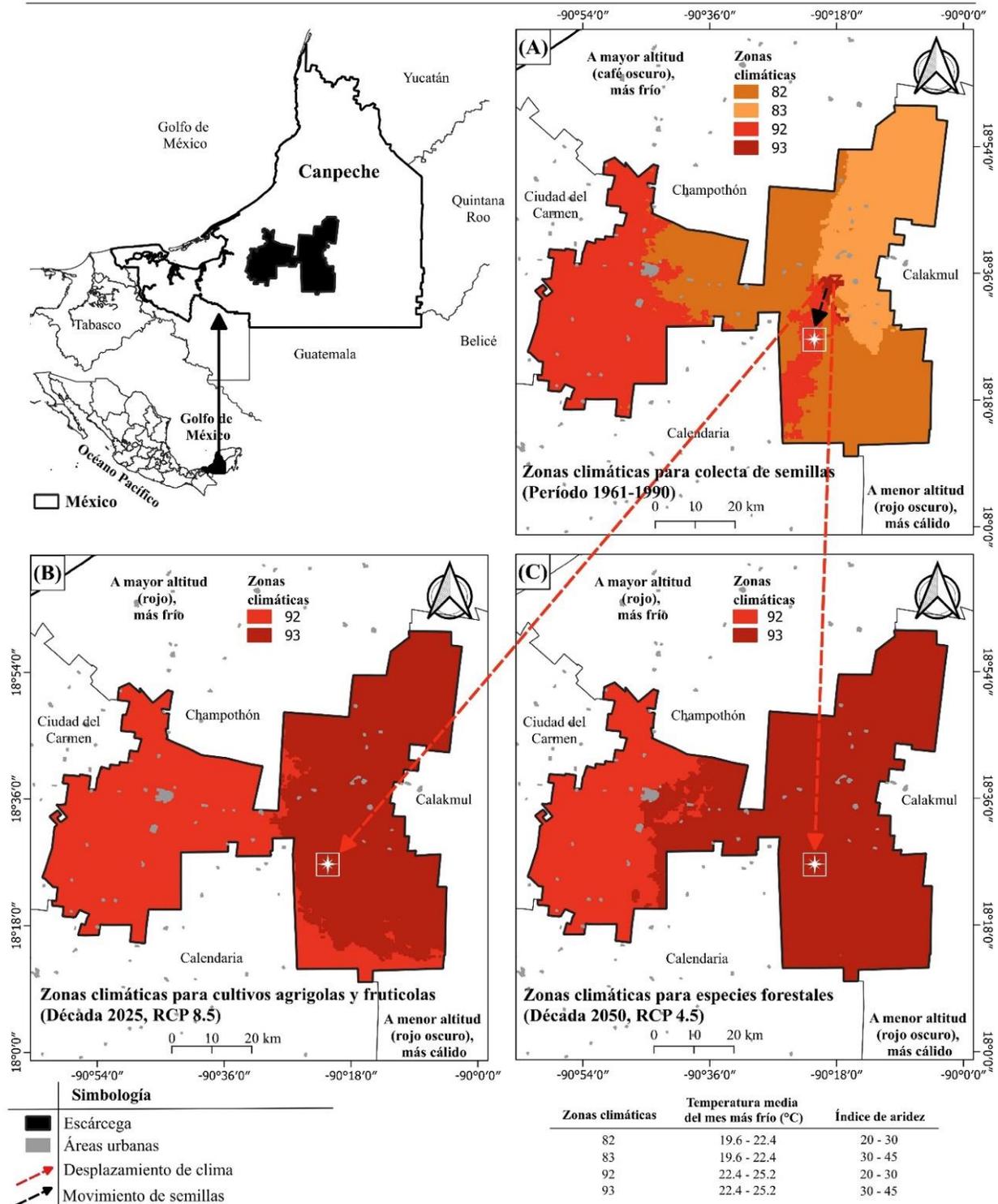


Figura 8. A) Zonas climáticas para colecta de semillas, B) Zonas climáticas para cultivos agrícolas y frutícolas, y C) Zonas climáticas para especies forestales. Escárcega, Campeche.

De no utilizarse una zonificación como la aquí propuesta, se corre el riesgo de que las especies forestales, agrícolas-frutícolas plantadas, gradualmente se vean desacopladas del clima para el cual están adaptadas, debido a la progresión del cambio climático (Sáenz-Romero *et al.* 2016). Simplemente, durante mayo 2023 a abril 2024, debido a los actuales efectos de El Niño, es de esperarse que, a nivel mundial, ocurra un incremento de temperatura anual promedio por arriba de +1.5 °C con respecto a un período preindustrial (1850-1990), con lo cual quedaría superado el límite inferior deseable del Acuerdo de París (Hansen *et al.* 2023a, 2023b, Sáenz-Romero 2024). Por lo tanto, se recomienda trasladar las fuentes de semillas de lugares más cálidos y secos a lugares de plantación actualmente más fríos y húmedos para compensar el cambio climático que se ha producido y que se espera que siga avanzando en las próximas décadas.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por la beca posdoctoral al primer autor (CVU 469568). A Iván González Márquez por proveer información de los sitios donde opera el Programa Interinstitucional de Especialidad en Soberanías Alimentarias y Gestión de Incidencia Local Estratégica (PIES-AGILES).

CONFLICTO DE INTERÉS

Los actores declaran no tener conflicto de intereses.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

PIES-AGILES es un capítulo del Ecosistema Nacional Informático (ENI) de Soberanía Alimentaria. Enlace: <https://alimentacion.conahcyt.mx/piesagiles/> Programa Interinstitucional de Especialidad en Soberanías Alimentarias y Gestión de Incidencia Local Estratégica (PIES-AGILES). Zonas de semillas basadas en el clima (formato .asc). Enlace: <https://zenodo.org/records/1052141> Climate based seed zones for Mexico: spatial grids to guide reforestation under observed and projected climate change.

LITERATURA CITADA

- Allen MR, Dube OP, Solecki W, Aragón-Durand F, Cramer W, Humphreys S, Kainuma M, Kala J, Mahowald N, Mulugetta Y, Perez R, Wairiu M, Zickfeld K (2018) Framing and context. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. https://www.researchgate.net/publication/369301788_Framing_and_Context_in_Global_warming_of_15C_An_IPCC_Special_Report. Fecha de consulta: 19 de agosto de 2024.
- Bower AD, Clair JBS, Erickson V (2014) Generalized provisional seed zones for native plants. *Ecological Applications* 24(5): 913-919. <https://doi.org/10.1890/13-0285.1>
- 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 KW, Clair JBS, Hamann A, López-Upton J, Gómez-Pineda E, Ortega-Rodríguez JM, 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>
- CONAFOR (2018) Mapa de formaciones forestales de México, acorde al uso de suelo y vegetación de la serie VI del INEGI del año 2017. Escala 1:250,000. Ciudad de México. https://idefor.cnf.gob.mx/mviewer/forma_forestal. Fecha de consulta: 20 de agosto de 2024.
- Estrada PF, Zabala HJ, Martínez AA, Raga G, Gay GC (2023) Cambio climático en México: observaciones y proyecciones, Estado y perspectivas del cambio climático en México: un punto de partida, CDMX, Programa de Investigación en Cambio Climático / Instituto de Ciencias de la Atmosfera y Cambio Climático. 81. <https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/11/estado-y-perspectivas-del-cambio-climatico-en-mexico-un-punto-de-partida-unam.pdf>. Fecha de consulta: 20 de agosto de 2024.
- Hammond WM, Williams AP, Abatzoglou JT, Adams HD, Klein T, López R, Sáenz-Romero C, Hartmann H, Breshears DD, Allen CD (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>
- Hamann A, Gylander T, Chen PY (2011) Developing seed zones and transfer guidelines with multivariate regression trees. *Tree Genet Genomes* 7:399-408. <https://doi.org/10.1007/s11295-010-0341-7>
- Hansen J, Sato M, Ruedy R (2023a) Global warming acceleration: El Niño measuring stick looks good. *Climate Science, Awareness and Solutions Program*. <https://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2023/MeasuringStick.2023.12.14.pdf>. Fecha de consulta: 14 de diciembre de 2023.
- Hansen JE, Sato M, Simons L, Nazarenko LS, Sangha I, Kharecha P, Zachos JC, von Schuckmann K, Loeb NG, Osman MB, Jin Q, Tselioudis G, Jeong E, Lacis A, Ruedy R, Russell G, Cao J, Li J (2023b) Global warming in the pipeline. *Oxford Open Climate Change* 3(1): kgad008, <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgad008>
- Hansen J, Sato M, Ruedy R, Schmidt GA, Lo K, Persin A (2019) Global temperature in 2018 and beyond. *Earth Institute, Columbia University: New York*. pp. 173-177. https://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2019/20190206_Temperature2018.pdf. Fecha de consulta: 19 de agosto de 2024.
- Havens K, Vitt P, Still S, Kramer AT, Fant JB, 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>
- IPCC (2018) Summary for policymakers. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner HO, Roberts D, Skea J, Shukla PR, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, Connors S, Matthews JBR, Chen Y, Zhou X, Gomis MI, Lonnoy E, Maycock T, Tignor M, Waterfield T (eds) *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. pp. 3-24. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>
- Kramer AT, Havens K (2009) Plant conservation genetics in a changing world. *Trends in Plant Science* 14(11): 599-607. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.08.005>
- López-Feldman AJ, Hernández-Cortés D (2016) Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El trimestre económico* 83(332): 459-496. <https://doi.org/10.20430/ete.v83i332.231>

- Manzanilla-Quijada GE, Osuna-Vallejo V, Zacarias-Correa AG, Gómez-Pineda E, Gallardo-Salazar JL, Sáenz-Romero C (2024) Zonas de transferencia de semillas para la reforestación en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca y la Meseta Purépecha ante el cambio climático (Seed transfer zones for reforestation in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve and the Meseta Purépecha facing climate change). *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 30(2): 1-21. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2023.11.056>
- Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner HO, Roberts D, Skea J, Shukla PR (2022) Global Warming of 1.5 C: IPCC special report on impacts of global warming of 1.5 C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>
- Minoli S, Jägermeyr J, Asseng S, Urfels A, Müller C (2022) Global crop yields can be lifted by timely adaptation of growing periods to climate change. *Nature Communications* 13(1): 7079. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34411-5>
- Núñez-Piedra ML, Martínez-Zurimendi P, Domínguez-Domínguez M, Cach-Pérez MJ, Sierra-de-Grado R (2023) Germplasm movement zones of eight forest species and future projections in the face of climate change in the Southeast of Mexico. *New Forests* 55(1): 119-141. <https://doi.org/10.1007/s11056-023-09968-8>
- Pike C, Potter KM, 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>
- Pralle SB (2013) Agenda-setting and climate change. In *Climate change and political strategy*. Routledge. pp. 123-141. <https://doi.org/10.1080/09644010903157115>
- QGIS Development Team (2022) QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>. Fecha de consulta: 20 de octubre de 2023.
- Sáenz-Romero C, Rehfeldt GE, Crookston NL, Duval P, St-Amant R, Beaulieu J, Richardson BA (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, Lindig-Cisneros RA, Joyce DG, Beaulieu J, Bradley JSC, Jaquish BC (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/10.5154/r.rchscfa.2014.10.052>
- 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>.
- St. Clair JB, Kilkenny FF, Johnson RC, Shaw NL, 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>
- Smith S, Nickson TE, Challender M (2021) Germplasm exchange is critical to conservation of biodiversity and global food security. *Agronomy Journal* 113(4): 2969-2979. <https://doi.org/10.1002/agj2.20761>
- Waha K, Van Bussel LGJ, Müller C, Bondeau A (2012) Climate-driven simulation of global crop sowing dates. *Global Ecology and Biogeography* 21(2): 247-259. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00678.x>
- WMO (2024) Global annual to decadal climate update 2024-2028. World Meteorological Organization. <https://reliefweb.int/report/world/wmo-global-annual-decadal-climate-update-2024-2028-enarruzh>. Fecha de consulta: 23 de agosto de 2024.
- 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>