

Informe final del proyecto “Evaluación de los impactos del cambio climático en polinizadores y sus consecuencias potenciales en el sector agrícola en México”

Responsable:	Dr. Mauricio Quesada Avendaño
Institución:	Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México
Dirección:	Antigua carretera a Pátzcuaro 8701, col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta C. P. 591890, Morelia, Michoacán, México
Correo electrónico:	mquesada@oikos.unam.mx
Colaboradores:	M. en C. Víctor M. Rosas Guerrero (Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM, México)
	M. en C. Luis E. A. Letelier Gálvez (Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM, México)
	Biól. Hernando A. Rodríguez Correa (Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM, México)
	Dra. Martha E. Lopezaraiza Mikel (Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM, México)
	Dra. Lorena Ashworth (Universidad Nacional de Córdoba, CONICET, Argentina)
	Dr. Ramiro Aguilar (Universidad Nacional de Córdoba, CONICET, Argentina)
	Dra. Silvana Martén Rodríguez (Instituto de Ecología A. C., México)
	Biól. Francisco Balvino Olvera (Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM, México)

Dr. Jesús María Bastida (Centro de Investigaciones en
Ecosistemas, UNAM, México)

Biól. Gumersindo Sánchez Montoya (Centro de Investigaciones
en Ecosistemas, UNAM, México)

Biól. Constantino Orduña (Centro de Investigaciones en
Ecosistemas, UNAM, México)

Dr. Adrián Ghilardi (Centro de Investigaciones en Geografía
Ambiental, UNAM, México)

Dr. Antonio González Rodríguez (Centro de Investigaciones en
Ecosistemas, UNAM, México)

Dr. Mauricio R. Quesada Avendaño

Investigador Titular “C”

Centro de Investigaciones en Ecosistemas

Universidad Nacional Autónoma de México

Contenido

Resumen.....	4
Abstract	5
1. Introducción	6
1.1 El papel de los polinizadores en la producción agrícola.....	6
1.2 Crisis global en la polinización.....	8
1.3 Efectos del cambio climático en la interacción planta-polinizador.....	10
1.4 Situación actual de las abejas manejadas para la polinización de cultivos.....	12
1.5 Iniciativas para el estudio y protección de polinizadores	16
2. Situación actual en México.....	16
2.1 Dependencia de polinizadores de plantas comestibles	18
2.2 Producción anual de plantas cultivadas	22
2.3 Valor del servicio de polinización	28
2.4 Especies de polinizadores de plantas comestibles.....	32
3. Escenarios por cambio climático en México al 2050.....	36
3.1 Cambios potenciales en la distribución de cultivos y polinizadores	36
3.2 Zonas clave para cultivos y polinizadores	41
3.3 Impacto económico potencial debido al cambio climático en los cultivos.....	46
4. Medidas para mitigar el impacto del cambio climático	52
5. Literatura citada	57

Resumen

La humanidad afrontará en los próximos años el reto de asegurar la provisión de comida para una población mundial que sigue creciendo a una tasa alarmante. La producción de alimentos de origen vegetal, depende en gran medida de la polinización por animales; aproximadamente entre el 74 y 84% de las plantas cultivadas como alimento para el hombre dependen de los polinizadores para la producción de frutos o semillas. El cambio climático podría afectar a los polinizadores y la provisión de gran cantidad de alimentos. En el presente estudio se documentan los polinizadores de las especies de plantas comestibles aprovechadas (EPCA) en México y el papel de éstos en la producción agrícola a nivel nacional. Asimismo, se modelan los posibles efectos del cambio climático sobre la interacción planta-polinizador y específicamente sobre la producción agrícola para el año 2050. Este es el primer estudio en su género a nivel mundial.

Se identificaron 345 especies de EPCA en México, de las cuales se encontró información sobre los niveles de dependencia de polinizadores de 240. El 86% de las EPCA que dependen directamente de la polinización (i.e. frutos y semillas), dependen en algún grado de polinizadores para su reproducción. El volumen promedio producido por hectárea y el valor promedio de producción por hectárea indican que las EPCA dependientes de polinizadores son más redituables económicamente que las EPCA no dependientes. El valor económico total del servicio de polinización para el 2010, de las 103 EPCA para las que se tiene información, fue de 43 mil millones de pesos, lo cual corresponde al 43% del valor total de producción de los cultivos dependientes y el 19% del total de EPCA. Se encontró información sobre la identidad de los polinizadores de 111 EPCA, resultando en al menos 237 especies de polinizadores, siendo las abejas el sistema de polinización predominante.

Se espera que para el 2050, disminuya el área potencial cultivable de 118 EPCA y la distribución de 28 especies de polinizadores, mientras que se espera un aumento en el área con relación al área actual de 54 EPCA y 20 especies de polinizadores. Considerando las tasas de cambio por especie para estimar el cambio en la superficie de cosecha con relación al 2010, para 74 cultivos se espera un decremento promedio en la superficie de cosecha de 22%. En promedio, se esperan 3.3 veces más pérdidas económicas en plantas no dependientes que en plantas dependientes de polinizadores con relación a la producción de frutos y semillas. Asimismo, se esperan pérdidas económicas de 39 mil millones de pesos anuales en cultivos de frutos y semillas y pérdidas de 36 mil millones de pesos anuales en otros cultivos de consumo.

Se discuten diversas medidas para mitigar el impacto del cambio climático en los cultivos y en sus polinizadores, resaltando la conservación de polinizadores como prioridad nacional para asegurar el suministro de alimentos para la población mexicana.

Abstract

In the next years human kind will face the challenge of ensuring food provision for a world population that continues to grow at an alarming rate. Food production of plant origin depends to a great extent on animal pollination; between 74 and 84% of the plants cultivated for human consumption depend on pollinators for their fruit or seed production. Climate change has the potential of affecting pollinators and the provision of food from a great amount of crops. In this study we document the pollinators of the human edible crop species (EPCA, its acronym in Spanish) in Mexico and the role of these pollinators on agricultural production at the national level. We also, for the first time at the global level, model the possible effects of climate change on plant-pollinator interactions, and specifically, on the agricultural production for the year 2050.

Information on the level of dependence on animal pollination was found for 240 species of the 345 EPCA originally identified for Mexico. Eighty six percent of the EPCA that depend directly on pollination (i.e. crops grown for their fruits and seeds) depend to certain extent on animal pollinators for their reproduction. The average volume produced per hectare and the average value of production per hectare indicate that the pollinator dependent EPCA are more profitable than the non-pollinator dependent EPCA. The total economic value for 2010 of the pollination service of the 103 EPCA for which there is information, was MXN\$ 43 thousand million, which corresponds to the 43% of the total production value of pollinator dependent crops and the 19% of the total EPCA production. We found information on the pollinator species of 111 EPCA, resulting in at least 237 pollinator species, being the bees the predominant pollination system.

According to climate change scenarios, for the year 2050, the potential area with adequate climate for growing 118 EPCA and the area of distribution of 28 pollinator species will decrease, while this area for 54 EPCA and 20 pollinator species will increase. Considering the resulting rate of change per species to estimate their harvest area in 2050, using the 2010 harvest area as reference, an average 22% area reduction is expected for 74 crops. On average, economic losses of fruit and seed production due to climate change for non-pollinator dependent crops are 3.3 times higher than the losses of pollinator dependent crops. Yearly economic losses amount MXN\$ 39 thousand million for fruit and seed crops and MXN\$ 36 thousand million for crops grown for the consumption of vegetative parts.

We discuss measures to mitigate the impact of climate change for crop species and their pollinators, highlighting the conservation of pollinators as a national priority to assure the provision of food for the Mexican people.

1. Introducción

Uno de los mayores retos que deberá afrontar la humanidad en los próximos años consiste en asegurar la provisión de comida para una población mundial que sigue creciendo a una tasa alarmante. El consumo de alimentos de origen vegetal constituye la fracción más importante de la dieta de la mayoría de las personas. Precisamente, la producción de alimentos de origen vegetal, depende en gran medida de la polinización por animales. La polinización por medio de animales es uno de los servicios más importantes provistos al ser humano por los ecosistemas naturales. Este servicio ecosistémico es brindado principalmente por animales silvestres y es esencial para asegurar la sustentabilidad de las actividades agrícolas y para suplir las demandas crecientes de alimentos. Sin embargo, el cambio climático, mediante modificaciones en las temperaturas y en los regímenes de precipitaciones podría afectar en gran medida la riqueza y abundancia de polinizadores y, por lo tanto, la provisión de este servicio tanto en los ecosistemas naturales como en los manejados (ej. cultivos).

En el presente informe se presentan los resultados de una búsqueda exhaustiva tanto en la literatura especializada, como de información recopilada en ámbitos públicos y privados sobre los polinizadores más importantes de las plantas comestibles cultivadas, manejadas y silvestres utilizadas en México y su importancia en la producción agrícola nacional. Se documenta el papel de los polinizadores en la producción agrícola a nivel mundial y nacional, así como la problemática mundial sobre los polinizadores y las acciones que se están realizando en diferentes lugares del mundo para atender este problema. Asimismo, se plantean los posibles efectos del cambio climático sobre la interacción planta-polinizador y específicamente en la producción agrícola.

1.1 El papel de los polinizadores en la producción agrícola

Recientes estudios a nivel mundial han revelado que aproximadamente entre el 74 y 84% de las plantas cultivadas como alimento para el hombre, dependen en cierto grado de los polinizadores para la producción de frutos o semillas [1-4]. A nivel mundial este servicio de polinización genera ganancias económicas estimadas en 153 mil millones de euros anualmente (aproximadamente 2.7 billones de pesos mexicanos; ~10% del valor de la producción agrícola mundial)[5]. Aunque en términos de volumen (toneladas), solamente el 35% de la producción de alimentos a nivel mundial, provienen de cultivos dependientes de

polinizadores[1]; éstos cultivos juegan un papel esencial en suministrar gran diversidad de alimentos y nutrimentos necesarios para el bienestar humano [1, 5]. Estudios comparativos han revelado que la diversidad de cultivos es mayor en los países en vías de desarrollo que en los países desarrollados [6]. La diversificación en la composición de la dieta humana incluye diferentes vegetales, semillas y frutos que son esenciales para el mantenimiento de la salud pública y el aseguramiento de una buena calidad de vida [7, 8]. Por lo tanto, para contribuir al bienestar humano, no sólo es importante considerar el volumen de alimentos producidos, sino también la diversidad de éstos.

Se ha estimado que en el mundo, el área cubierta por cultivos dependientes de polinizadores se ha incrementado en más del 300% durante los últimos 50 años [9, 10]. Actualmente se sabe que los polinizadores incrementan la producción de 87 de los principales cultivos en el mundo [1]. En Latinoamérica, África y Asia, en promedio, 40% del área cultivada corresponde a cultivos con algún grado de dependencia de polinizadores [11]. Según estimaciones basadas en los últimos 50 años, la tendencia actual mundial es a incrementar el área sembrada con cultivos dependientes de polinizadores, tendencia significativamente mayor en los países en vías de desarrollo que en los desarrollados [9].

Uno de los indicadores de la actividad de los polinizadores en los ecosistemas es la frecuencia de plantas con limitación por polen (reducción en la producción de frutos y/o semillas debido a limitaciones en la cantidad o calidad de polen que se transmite de una flor a otra) [12, 13]. En comunidades naturales, más del 62% de las especies de plantas presentan limitación por polinización [12, 14]. Además, existen muchas especies de plantas que no podrían reproducirse en ausencia de polinizadores y otras solo podrían hacerlo parcialmente [15]. La escasa literatura sobre limitación por polen en cultivos, sugiere que existe una amplia variación en los niveles de dependencia de los polinizadores para su producción [1]. Se espera que ciertas especies de plantas cultivadas sean más vulnerables a la reducción de sus polinizadores que otras, principalmente aquellas con sistemas sexuales dioicos o monoicos, con polinización especialista y aquellas con sistemas de incompatibilidad [16]. No obstante, diversos estudios han encontrado que tanto especies cultivadas genéticamente autoincompatibles (que no pueden ser fertilizadas por su propio polen) como especies compatibles, han disminuido su producción de frutos y/o semillas cuando disminuye la abundancia y/o diversidad de sus polinizadores [17-21].

1.2 Crisis global en la polinización

El rápido y constante crecimiento de la población humana ha reducido la cantidad de hábitats naturales, debido entre otros factores, a una creciente demanda de áreas productoras de alimentos, lo que genera una gran presión sobre el servicio ecosistémico de polinización. Actualmente, el cambio de uso de suelo (principalmente de bosque a uso agrícola o urbano), invasión de especies exóticas y uso intensivo de pesticidas y herbicidas figuran entre los principales factores que afectan profundamente la diversidad y distribución de especies, así como el funcionamiento de los ecosistemas y los servicios ecosistémicos, entre ellos la polinización [22, 23]. Específicamente se han documentado disminuciones en la diversidad y/o abundancia de polinizadores debido a la intensificación de la agricultura [20, 24-27], pérdida de hábitat [19, 27-29], introducción de especies exóticas [30, 31] y uso de pesticidas [15, 27, 32-34]. Asimismo, se han asociado diversas extinciones locales de polinizadores como abejas, moscas y mariposas a perturbaciones antropogénicas [35, 36]. A excepción del Antártico, en cada continente existen reportes de disminución de polinizadores [11]. Es muy probable que existan interacciones sinérgicas entre varios de estos factores que afectan a los polinizadores, agudizando su impacto. Sin embargo, existe poca evidencia del efecto que tienen varios factores en conjunto e interacción [37, 38].

El cambio de uso de suelo y la subsecuente reducción y fragmentación de hábitat son la principal amenaza para los polinizadores naturales. Un reciente meta-análisis de la respuesta de las abejas, el principal grupo de polinizadores, a los disturbios antropogénicos (fuego, agricultura, ganadería, pesticidas, tala y pérdida de hábitat) muestra que hay un efecto general negativo de los disturbios sobre la diversidad y abundancia de abejas, siendo la fragmentación y pérdida de hábitat el principal responsable del efecto negativo [27]. Sin embargo la fragmentación es el disturbio más estudiado y la falta de un efecto negativo significativo detectado para otros disturbios se puede deber a la baja disponibilidad de estudios que aborden el tema.

Hay evidencia de que el impacto en los polinizadores repercute en las poblaciones de plantas silvestres cuya reproducción depende en esencia de éstos [35, 39-42]. Biesmeijer y colaboradores [35] reportan que en el Reino Unido y en Holanda la disminución en la diversidad de polinizadores está más relacionada con la disminución de especies de plantas polinizadas por animales que con la disminución de especies autógamas y plantas polinizadas

por viento. Asimismo, Aguilar y colaboradores [39, 43] demuestran que la polinización, la reproducción y la diversidad genética de las especies de plantas auto-incompatibles, que requieren de polinización cruzada, está más afectada por la fragmentación que la de especies auto-compatibles.

Se han documentado la disminución de polinizadores [36, 44] y cambios en la composición y estructura de las comunidades de abejas debidos a la fragmentación de hábitat [27, 45-48]. Sin embargo, ciertas especies o gremios de polinizadores responden de forma distinta al disturbio. Esta respuesta diferencial de especies podría explicar el efecto positivo que la urbanización tiene en la diversidad y abundancia de polinizadores [46, 49], como lo muestran los resultados de un estudio en un gradiente de urbanización en el Reino Unido donde la diversidad y abundancia de polinizadores disminuyen con mayores grados de urbanización, pero algunas especies de abejas y sirfidos son favorecidos [50].

Una consecuencia del cambio de uso de suelo a la agricultura es la disponibilidad de una gran cantidad de recursos florales provista por algunos cultivos, lo que tendría un efecto positivo en las poblaciones de algunos polinizadores como los abejorros [51]. Sin embargo, es importante tener en cuenta que sólo una fracción de la comunidad de polinizadores podría beneficiarse de estos recursos, además de que estas floraciones masivas están disponibles por periodos breves de tiempo, lo que hace poco probable un efecto positivo generalizado. Un efecto negativo de la agricultura sobre los polinizadores es a través del uso de agroquímicos que pueden causar la muerte de polinizadores por intoxicación y reducir la diversidad de abejas [52, 53] o reducir la disponibilidad de recursos florales (en el caso de herbicidas) en zonas agrícolas [54].

Por otro lado, se ha documentado que la proximidad a bosques naturales promueve la abundancia y diversidad de polinizadores en sistemas agrícolas, e incrementa la productividad de cultivos [29, 55], lo que muestra que los polinizadores dependen de hábitats naturales posiblemente para anidar y obtener otros recursos, y que habrá un requerimiento mínimo de éstos en el paisaje para un adecuado servicio de polinización. Garibaldi y colaboradores también muestran que la distancia a hábitats naturales afecta la variación espacial y temporal del servicio de polinización [55]. En parcelas agrícolas espacialmente distantes de hábitats naturales, la riqueza de especies de polinizadores, las tasas de visita y la producción de frutos es menos estable (la respuesta es más variable) a lo largo del día y de

una planta a otra que en parcelas cercanas a hábitats naturales. Esto hace más variable y menos predecible la producción agrícola.

Las especies de insectos introducidas pueden tener efectos negativos en los polinizadores nativos. Cerca de 20 especies de abejas solitarias (*Nomia*, *Osmia*, *Megachile*) y sociales (*Apis* y *Bombus*) han sido introducidas fuera de sus rangos nativos por liberaciones intencionadas y por el comercio de colonias, 18 de las cuales se han establecido exitosamente [56]. Las especies de abejas introducidas pueden competir por recursos con las abejas nativas. En el caso de los abejorros (*Bombus*), se ha demostrado que se pueden aparear con especies de abejorros nativos, lo cual puede reducir las poblaciones de las especies nativas al disminuir el número de reinas que pueden producir progenie viable, puede erosionar la diversidad genética de poblaciones locales, e incluso llevar a la extinción de especies [56]. Las especies introducidas también pueden incrementar el riesgo de transmisión de enfermedades a poblaciones locales o incluso a otras especies, promoviendo un cambio de especies de hospedero. A pesar del riesgo, existe muy poca información al respecto para *Bombus* y *Apis* y menos aún para otras especies silvestres [56].

Por otro lado, las especies de plantas introducidas también pueden afectar las poblaciones de polinizadores. Éstas pueden ser más atractivas y producir más néctar o polen que las nativas [57], lo que podría afectar positivamente a las especies de polinizadores que las utilizan. Por ejemplo, *Impatiens glandulifera* es visitada por más de 50 especies de polinizadores en el Reino Unido, donde es una especie invasora, y puede facilitar la sobrevivencia de abejorros [58, 59]. Sin embargo, al desplazar especies de plantas nativas, las plantas invasoras disminuyen la cantidad de recursos para otras especies de polinizadores nativos o recursos que estarían disponibles en otras temporadas del año. Por lo tanto, es difícil predecir los efectos de plantas introducidas, ya que éstos pueden diferir según la especie de que se trate.

1.3 Efectos del cambio climático en la interacción planta-polinizador

El panel intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés) ha pronosticado un incremento en la temperatura global entre 1.1 °C y 6.4 °C durante este siglo, siendo más drástico el cambio a mayores latitudes [60]. Se espera que conforme aumente la

temperatura, la distribución de las especies cambiará hacia mayores latitudes o altitudes [61, 62]. Se ha encontrado que algunas plantas [63], mariposas [64, 65] y aves [66-68] se han expandido hacia los polos debido al cambio climático. Sin embargo, Thomas y colaboradores establecen que el cambio climático probablemente sea la mayor amenaza a la biodiversidad mundial, pronosticando la extinción del 18-35% de las especies al 2050 dependiendo del escenario.

La interacción planta-polinizador puede ser especialmente vulnerable al cambio climático si las especies involucradas responden de manera diferencial a los cambios en la temperatura por lo que se espera que el cambio climático provoque desajustes temporales en la interacción [38, 62, 69, 70]. Por ejemplo, alrededor de 500 especies de plantas de Massachusetts, Estados Unidos, han adelantado su floración comparada con la de hace unos 150 años [71]. Asimismo, temperaturas más calientes están correlacionadas con una actividad más temprana en la actividad de algunos insectos polinizadores [62]. Por ejemplo, Bartomeus y colaboradores [70] indican que los cambios fenológicos en varias especies de abejas están sincronizados con las plantas que estas visitan. Sin embargo, en algunos casos, como en los polinizadores *Apis mellifera* y *Pieris rapae*, han experimentado un mayor avance fenológico que las plantas, lo cual ha provocado un desajuste temporal con algunos de sus recursos florales [62]. Algunas plantas en Japón han respondido a un aumento en la temperatura adelantando su floración, mientras que el periodo de actividad de los abejorros que las polinizan no se ha visto alterado [72]. Sin embargo, un estudio reciente menciona que no es posible predecir los cambios en la fenología observados por décadas por medio de experimentos de aumento de temperatura [73].

El efecto del cambio climático en los polinizadores dependerá de su tolerancia y plasticidad a cambios de temperatura y dieta. Sin embargo, es escasa la información sobre tolerancia o plasticidad de casi todas las especies más importantes de polinizadores. Deutsch y colaboradores [61], sugieren que aunque en los trópicos se espera que el cambio climático sea menor, las alteraciones en los regímenes de precipitación y temperatura podrían afectar más severamente a los polinizadores tropicales debido a que son más sensibles a cambios en la temperatura que los polinizadores de mayores latitudes.

El IPCC también ha reportado cambios en la frecuencia e intensidad de precipitación [60], lo cual provocaría sequías en diversas partes del planeta y grandes impactos económicos debido a la pérdida de cosechas. La sequía puede disminuir la cantidad de flores, provocando

disminuciones en los recursos disponibles para los polinizadores y por consecuencia una reducción en la frecuencia de visitas florales. Además la sequía podría disminuir la viabilidad del polen e incrementar el aborto de semillas, provocando una reducción en la producción de frutos y semillas de las plantas. Por ejemplo, la cosecha de granos de frijol, arroz, soya y cacahuete fue disminuyendo paulatinamente conforme aumentaba la temperatura hasta ser nula la cosecha al alcanzar 32,36, 40 y 40°C, respectivamente [74]. Por lo tanto, la evidencia muestra que el cambio climático en general tendrá un efecto negativo sobre las plantas y sus polinizadores.

1.4 Situación actual de las abejas manejadas para la polinización de cultivos

Apis mellifera

La abeja de la miel *Apis mellifera* actualmente tiene una distribución global debido a su domesticación y a su introducción en diferentes lugares del mundo. Además de ser manejada para la producción de miel, esta especie es la más ampliamente manejada y utilizada como proveedora del servicio de polinización de cultivos [37], lo que aumenta la producción agrícola hasta un 96% en algunos cultivos [1]. En México, *A. mellifera* también se utiliza para la polinización de cultivos, aunque en menor escala [ej. 75]. Los agricultores tienen la opción de contratar los servicios de polinización ante las dependencias locales de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) o bien ante las asociaciones locales de apicultores, las que congregan a productores apícolas debidamente acreditados. En 2008 se utilizaron cerca de 136 mil colmenas principalmente para la polinización de cucurbitáceas y de aguacate, siendo Sinaloa, Sonora, Chihuahua y Michoacán los estados donde se maneja el mayor número de colmenas con este propósito (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP 2008).

Se considera que *Apis mellifera* es el principal proveedor de servicios de polinización a cultivos a nivel mundial y se ha estimado que es responsable del 80% de los servicios agrícolas de polinización en el mundo [76]. El uso de *A. mellifera* aumenta la producción agrícola hasta un 96% en algunos cultivos [1]. Sin embargo, estudios más recientes sugieren que esta cifra está sobreestimada y que el papel de polinizadores nativos es mayor de lo previamente pensado. Un estudio realizado en el Reino Unido, estima que el número de colonias manejadas de *Apis mellifera* sólo puede proveer el 34% de la demanda de la

polinización de cultivos dependientes de polinizadores, que alcanza el 20% del área cultivada [77]. De forma similar, Garibaldi y colaboradores [55] encuentran para 29 estudios de distintos biomas y cultivos que el porcentaje de visitas a flores realizadas por *Apis mellifera* es en promedio del 50%. Estas estimaciones recientes siguen colocando a *Apis mellifera* como el polinizador principal de muchos cultivos.

Notablemente, este importante polinizador también se ve amenazado por actividades antrópicas. En Europa y Estados Unidos han desaparecido las colonias silvestres o asilvestradas de *Apis mellifera* [78] y se atribuye principalmente al ácaro ectoparásito *Varroa destructor*, especie invasora parásita de otra especie de *Apis*, nativa de Asia [79]. Sumado a esto, se ha registrado un decremento en las colonias manejadas de *Apis mellifera*. En Estados Unidos se perdieron 59% de las colonias entre 1947 y 2005, y en Europa central el 25% entre 1985 y 2005 [80]. Se presume que varios factores actúan en sinergia para ocasionar el llamado desorden/trastorno del colapso de colonias que han provocado estas pérdidas [37]. Estos factores incluyen el estrés ambiental (ej. mala nutrición, exposición a agroquímicos), plagas y patógenos y la baja diversidad genética. A pesar del decline regional de *A. mellifera*, el número de colonias manejadas ha incrementado en otras regiones [81, 82]. A nivel mundial el número de colonias aumentó el 45% desde 1961, sin embargo, la proporción de cultivos dependientes de polinizadores ha aumentado más del 300% [10]. La reducción en la producción agrícola regional se ha asociado a la insuficiencia de polinizadores y se espera que en el futuro la demanda de polinizadores podría no satisfacerse [83]. Por lo tanto, la dependencia de la producción agrícola mundial en una o pocas especies de polinizadores es muy riesgosa. Debido a la preocupante situación de *Apis mellifera* en algunos países, ha surgido el interés de estudiar especies de polinizadores nativos de cada región, pero aún se carece de información suficiente de estas especies.

En 1956 la raza africana *A. mellifera scutellata* fue introducida por investigadores brasileños en Sao Paulo (Brasil) con el objetivo de desarrollar abejas más productivas y mejor adaptadas a condiciones tropicales [84]. Las colonias establecidas produjeron enjambres y las reinas africanas establecieron sus colonias en nuevos sitios. Las abejas africanas se hibridizaron con las europeas y así comenzó el proceso de africanización de las abejas europeas asilvestradas y manejadas desde Brasil hasta el sur de Estados Unidos. Excepto en Chile y el sur de Argentina, actualmente se encuentran en todos los países del centro y sur de América [85]. La selección natural ha favorecido las características africanas adaptadas a

condiciones tropicales. En México fueron reportadas por primera vez en Chiapas en 1986. En 1987 llegaron a Guerrero, Michoacán y Tamaulipas, y en 1990 al altiplano Mexicano. En 1993 ya se habían reportado en todos los estados de México, excepto Baja California Sur, donde las condiciones desérticas retrasaron su llegada hasta el 2005 [86].

En México, el proceso de africanización aunado a la llegada de *Varroa destructor* detectada en 1992, ocasionaron una disminución en el número de colonias manejadas y en la producción de miel (Figura 1). Las grandes empresas productoras de miel que manejaban miles de colmenas desaparecieron [85]. Las abejas africanizadas son más agresivas, enjambran con mayor facilidad, invierten más energía en la producción de obreras y en reproducción, almacenan menos miel y recolectan más polen que las abejas europeas [85]. Las prácticas de manejo se han adaptado a las características de las abejas africanizadas, y el costo del manejo de colonias ha aumentado un 30% [87]. Con esto ha sido posible recuperar en parte el número de colonias manejadas y la producción de miel, que continúan por debajo de los niveles previos a la africanización. A pesar de que las grandes empresas desaparecieron, el número de apicultores a pequeña escala ha incrementado y desde el 2003 el número de colonias manejadas se ha estabilizado (Figura 1). Las abejas africanizadas son más resistentes a algunas enfermedades [88], y quizás debido a la africanización, el reciente trastorno del colapso de colonias que ocurre en Estados Unidos no se ha reportado en México.

Como consecuencia de la africanización, existe en México un gran número de colonias ferales de abejas africanizadas. Éstas, por un lado tienen la capacidad de proveer el servicio de polinización tan eficientemente como las abejas europeas [89], pero por otro lado, a pesar de que la evidencia es indirecta, se presume que compiten y han afectado a las poblaciones de un gran número de especies de polinizadores nativos [90].

Bombus

Especies del género *Bombus* (abejorros) le siguen a *Apis mellifera* en importancia para la polinización de cultivos llevada a cabo por especies manejadas. Estas especies han sido criadas comercialmente desde 1987 y desde entonces se han introducido en más de 11 países [56]. Para el 2004 se comercializaba *B. terrestris* en Euroasia (incluyendo la subespecie *B. t. canariensis*), *B. impatiens* en Norte América, *B. lucorum* en Eurasia, de *B. ignitus* en Asia del este) y de *B. occidentalis* en Norteamérica [91]. En México desde 1995 se comercializa la especie no nativa *B. impatiens*, y actualmente existen 2 empresas que crían y comercializan esta especie para la polinización de cultivos en invernadero: la compañía holandesa KOPPERT

Biological Systems y la empresa belga Biobest Biological Systems. Existe la posibilidad del escape y naturalización de esta especie, que podría competir y desplazar a especies nativas o incluso hibridizarse con especies nativas, resultando en la muerte de reinas o progenie no viable [56]. Existe evidencia de apareamientos entre *B. impatiens* y el abejorro nativo *B. ephippiatus* [92]. Afortunadamente, en los últimos años se desarrolló la técnica para criar la especie nativa *B. ephippiatus* y se ha comenzado con su comercialización [93].

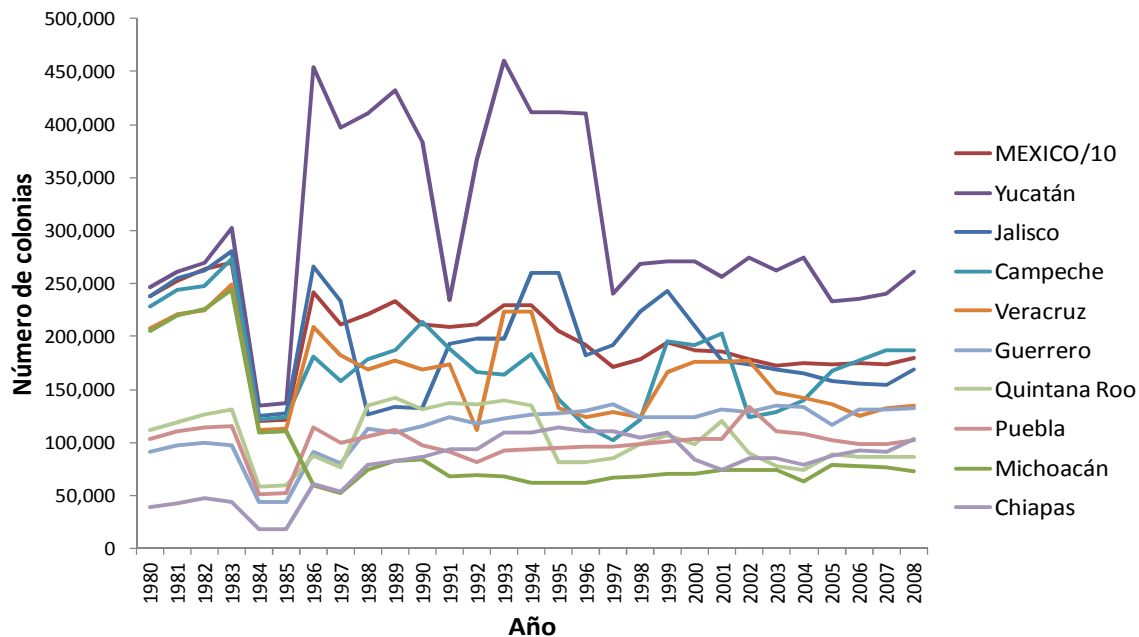


Figura 1. Colonias de *Apis mellifera* manejadas en México y en los Estados del país donde se maneja el mayor número de colonias. El total para el país es el valor mostrado multiplicado por 10. Fuente: Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON 2009).

Abejas sin aguijón

Las abejas sin aguijón conocidas como meliponas, son polinizadores particularmente importantes de muchas plantas tropicales silvestres y cultivadas (~90 especies de cultivos)[94]. Algunos estudios han evaluado la eficiencia de polinización en cultivos de invernadero de varias especies de abejas sin aguijón (Apidae, Meliponini) y la posibilidad de

su cría para dar servicio de polinización en invernaderos [95]. Muchas especies de esta tribu de abejas son nativas de México, producen miel y han sido manejadas desde tiempos precolombinos por varios grupos indígenas en Mesoamérica.

1.5 Iniciativas para el estudio y protección de polinizadores

La Convención de Diversidad Biológica ha establecido la Iniciativa Internacional para la Conservación y Uso Sustentable de Polinizadores con el objetivo de monitorear el declive de polinizadores, sus causas y su impacto en los servicios de polinización; hacer frente a la falta de información taxonómica de polinizadores; y evaluar el valor económico de la polinización e impacto económico del declive del servicio de polinización. Actualmente existen varias organizaciones que promueven la conservación de polinizadores y se han financiado proyectos de investigación para mejorar el entendimiento de la problemática del declive de polinizadores (Tabla 1).

2. Situación actual en México

Se espera que el declive en el servicio ecosistémico de polinización afecte más la producción de cultivos en países en vías de desarrollo donde no pueden sustituir este servicio gratuito brindado por polinizadores silvestres por servicios alternativos de polinizadores manejados, debido al alto costo que esto implica [7, 96, 97]. Además del nivel de pobreza, la densidad poblacional y el nivel de dependencia de polinizadores de plantas comestibles son factores útiles para identificar a los países más vulnerables a la crisis de polinizadores [7]. México es un país altamente poblado (112 millones de habitantes)[98], con aproximadamente la mitad de su población bajo parámetros internacionales de pobreza [99] y con aproximadamente 85% de sus especies cultivadas productoras de frutos/semillas dependientes de polinizadores [3].

México es uno de los centros de origen de diversos cultivos y de domesticación de plantas más importantes a nivel mundial [100, 101]. En México se han domesticado o semi-domesticado 140 especies de plantas, principalmente para consumir sus frutos o semillas [3]. Las variedades silvestres de dichas plantas son recursos genéticos potenciales para el mejoramiento de la calidad y productividad de sus parientes cultivados [102, 103].

Tabla 1. Iniciativas para el estudio y protección de polinizadores.

Proyecto/ Organización	Financiamiento	Región	URL
African Pollinator Initiative (AFI)	FAO, Agricultural Research Council	Ghana, Kenia, Sudáfrica, India, Nepal, Pakistán	http://www.arc.agric.za/home.asp?pid=3493
AgriLand Project	UK Insect Pollinators Initiative	Reino Unido	http://www.agriland.leeds.ac.uk/about/index.php
Brazilian Pollinators Initiative (BPI)		Brasil	http://www.webbee.org.br/ibp/php/workshop/index.html
California Agricultural Pollinator Project	The Xerces Society for Invertebrate Conservation, Natural Resource Conservation Service (NRCS)	USA	http://www.xerces.org/california-agricultural-pollinator-project/
European Pollinator Initiative (EPI)	FAO	Europa	http://europeanpollinatorinitiative.org/
Global Pollination Project	GEF/UNEP/FAO	Brasil, Ghana, India, Kenia, Nepal, Pakistán y Sudáfrica	http://www.sanbi.org/programmes/conservation/unepgeffao-global-pollination-project
Iniciativa Colombiana de Polinizadores (ICPA)	Universidad Nacional de Colombia, Instituto Humboldt Colombia	Colombia	http://www.ciencias.unal.edu.co
Landcare Research	Crown Research Institutes (CRIs)	Nueva Zelanda	http://www.landcareresearch.co.nz
North American Pollinator Initiative	North American Pollinator Protection Campaign (NAPPC)	USA, Canadá, México	http://www.pollinator.org/projects.htm
Status and Trends of European Pollinators (STEP)	European Commission	Europa	http://www.step-project.net
The Canadian Pollination Initiative (CANPOLIN)	Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada	Canadá	http://www.uoguelph.ca/canpolin/index.html
The Great Pollinator Project		Nueva York	http://greatpollinatorproject.org/
The Great Sunflower Project		USA	http://www.greatsunflower.org/
The Oceania Pollinator Initiative (OPI)	FAO	Australia	http://www.oceaniapollinator.org
USGS Pollinators Project	National Biological Information Infrastructure (NBII), ESA, NAPPC	Norteamérica	http://www.nbii.gov/portal/server.pt/community/about_the_project/1510

Esto resalta la importancia de la conservación en México de las variedades silvestres de diversos cultivos nativos. Aunado a esto, los polinizadores silvestres nativos también son cruciales para la producción de frutos y semillas de plantas domesticadas o que no son tradicionalmente cultivadas, pero si son intensamente recolectadas en ambientes naturales [3]. Por todo lo anterior, se debe considerar a México como un país socialmente muy vulnerable a la pérdida de sus polinizadores, ya que una gran parte de su población depende exclusiva y directamente de este servicio ecosistémico para su supervivencia y calidad de vida [3].

2.1 Dependencia de polinizadores de plantas comestibles

Se ha reportado que de las 316 especies de plantas cultivadas en México, 236 son utilizadas como plantas comestibles (incluyendo bebidas)[3]. De estas 236 especies, se consumen los frutos y/o semillas de 171 especies, de las cuales el 85% dependen en cierta medida de los polinizadores [3]. Aunque el mayor volumen de producción de alimentos en México proviene de cultivos no dependientes de polinizadores, éstos producen la mitad de volumen por unidad de área que los cultivos dependientes de polinizadores [3]. De manera similar a lo encontrado a nivel mundial [5], los cultivos de México dependientes de polinizadores son económicamente más redituables por unidad de superficie que los cultivos no dependientes de polinizadores [3]. Por lo tanto, los polinizadores son muy importantes no solo para abastecer a la población de gran diversidad de alimentos con importancia nutricional, sino también en términos económicos, para incrementar los ingresos por hectárea de cultivo.

En el presente estudio se actualizó la lista de plantas comestibles cultivadas, manejadas o silvestres utilizadas (poblaciones silvestres sujetas a algún tipo de práctica sin perturbaciones significativas) por la población mexicana (“especies de plantas comestibles aprovechadas”, EPCA de aquí en adelante) reportada por Ashworth y colaboradores [3] a partir del Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON 2010) elaborado por la SAGARPA(<http://www.siap.gob.mx>) y a partir de diversos estudios etnobotánicos publicados [3 y referencias citadas ahí]. Cada especie fue clasificada de acuerdo a su uso principal en las siguientes categorías descritas por la FAO:(1) aceites comestibles; (2)azúcares; (3) bebidas;(4) cereales/pseudocereales; (5)condimentos; (6) estimulantes; (7) frutos; (8) frutos secos; (9)legumbres; (10) raíces/tubérculos; y(11) vegetales. De acuerdo a la parte principal

utilizada de cada EPCA se determinó la importancia de la polinización en la obtención de la parte comestible, considerando dos categorías: (1) directa, cuando la parte comestible es fruto o semilla o (2) indirecta, cuando la parte comestible es raíz, flor, hoja o tallo. En esta segunda categoría se evaluó la importancia de los polinizadores en la producción de semillas útiles para la propagación y cultivo de dicha especie. A pesar de que algunas EPCA se reproducen asexualmente (ej. agaves) o se obtienen frutos por apomixis (ej. piña, plátano), la reproducción sexual (i.e. polinización) es un evento clave e irremplazable en el ciclo de vida de las plantas, pues permite mantener o aumentar la diversidad genética de las poblaciones y provee una fase de dispersión diploide independiente de progenies con características genéticas únicas para el mantenimiento de la diversidad genética.

Para determinar el nivel de dependencia directa o indirecta de polinizadores de cada EPCA, se buscó información en la literatura publicada en bases de datos electrónicas especializadas (AGRICOLA, AGRIS, Google Scholar, ISI Web of Knowledge, SCIELO, Scopus). Las EPCA consideradas dependientes de polinizadores fueron aquellas cuya producción de frutos/semillas incrementaba en presencia de polinizadores. Las EPCA consideradas no dependientes de polinizadores fueron aquellas cuya producción de frutos/semillas no incrementaba en presencia de polinizadores, es decir, que presentan predominancia de polinización por viento, polinización autónoma o apomixis. Cuando no existía información sobre la dependencia de los polinizadores se consideraron dependientes de polinizadores cuando las plantas presentaban caracteres florales asociados a polinización biótica: flores con atractivos (ej. guías de néctar, colores vivos, olor fuerte, tamaño grande), producción de recompensas, órganos sexuales no expuestos, separación antera-estigma y/o flores unisexuales. Aquellas plantas reproducidas vegetativamente para su cultivo y aquellas con producción de frutos apomícticos comestibles fueron consideradas no dependientes de polinizadores.

Se identificaron 345 EPCA (Apéndice 1), de las cuales 100 son cultivadas en gran escala (>1,000 ha cultivadas/año), 76 en pequeña escala (<1,000ha cultivadas/año) y 169 manejadas *in situ*, recolectadas en estado silvestre o sin datos oficiales de producción (Figura 2). La polinización es importante para la obtención directa de alimentos de 242 especies y de manera indirecta de 103 especies. La parte vegetal más consumida es el fruto (187 especies), seguido en orden descendente por las semillas (58), tallos (44), hojas (30), raíces/tubérculos/bulbos (17) y flores (9 especies; Figura 3).

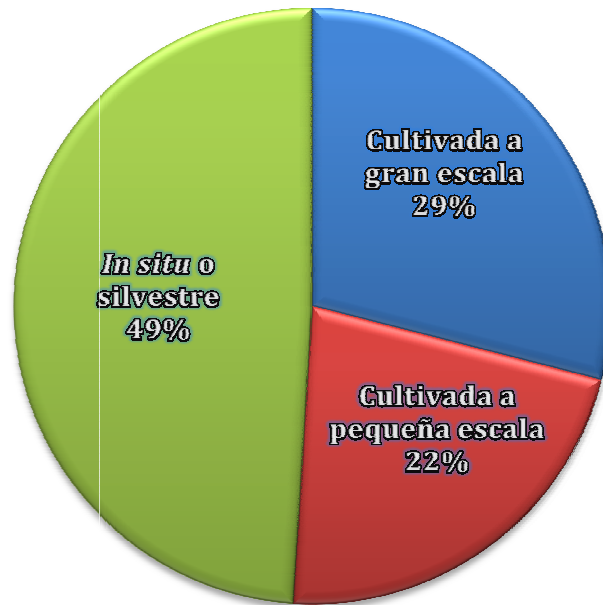


Figura 2. Tipo de manejo en especies de plantas para consumo humano en México.

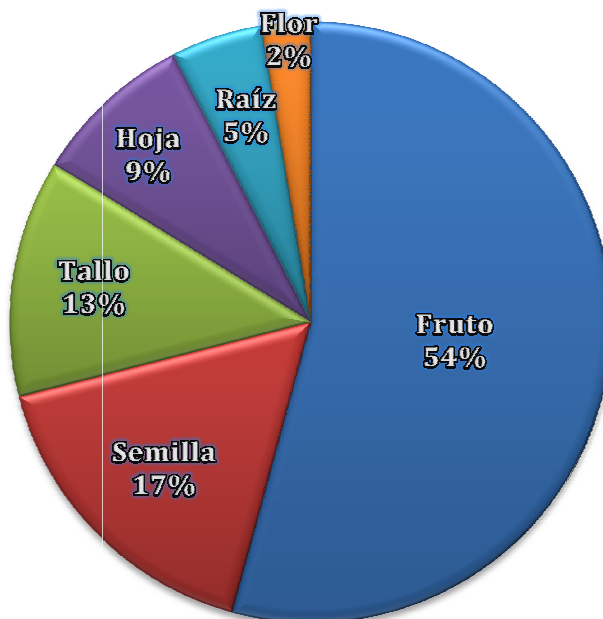


Figura 3. Parte vegetal utilizada de las especies de plantas para consumo humano en México.

De las 345 EPCA identificadas en el país, encontramos información sobre los niveles de dependencia de polinizadores de 240 EPCA. El 71% (170 especies), depende en algún grado de polinizadores bióticos para su reproducción (Figura 4a). Esta estimación es similar a lo encontrado a nivel mundial (74%)[1], en regiones tropicales (70%)[104], en el neotrópico (70%)[105] y en Argentina (74%)[4]. Considerando las 50 especies de cultivos más importantes económicamente para México en el 2010, el 65% de estos cultivos depende en algún grado de los polinizadores para su producción (Figura 4b).

a



Figura 4. Dependencia de polinizadores de **a)** las plantas comestibles y **b)** de los 50 cultivos con mayor valor de producción en México. Los números insertos en las barras indican el número de especies.

De los 242 EPCA que dependen directamente de la polinización (frutos y semillas), el 86% depende en algún grado de la polinización biótica; lo cual coincide con lo reportado por Ashworth y colaboradores [3](85% de 171 especies consumidas por sus frutos o semillas). Por otro lado, de los productos alimentarios que dependen indirectamente de la polinización (tallos, hojas, raíces y flores), solamente el 34% depende en algún grado de la polinización biótica para su reproducción sexual (Figura 5).

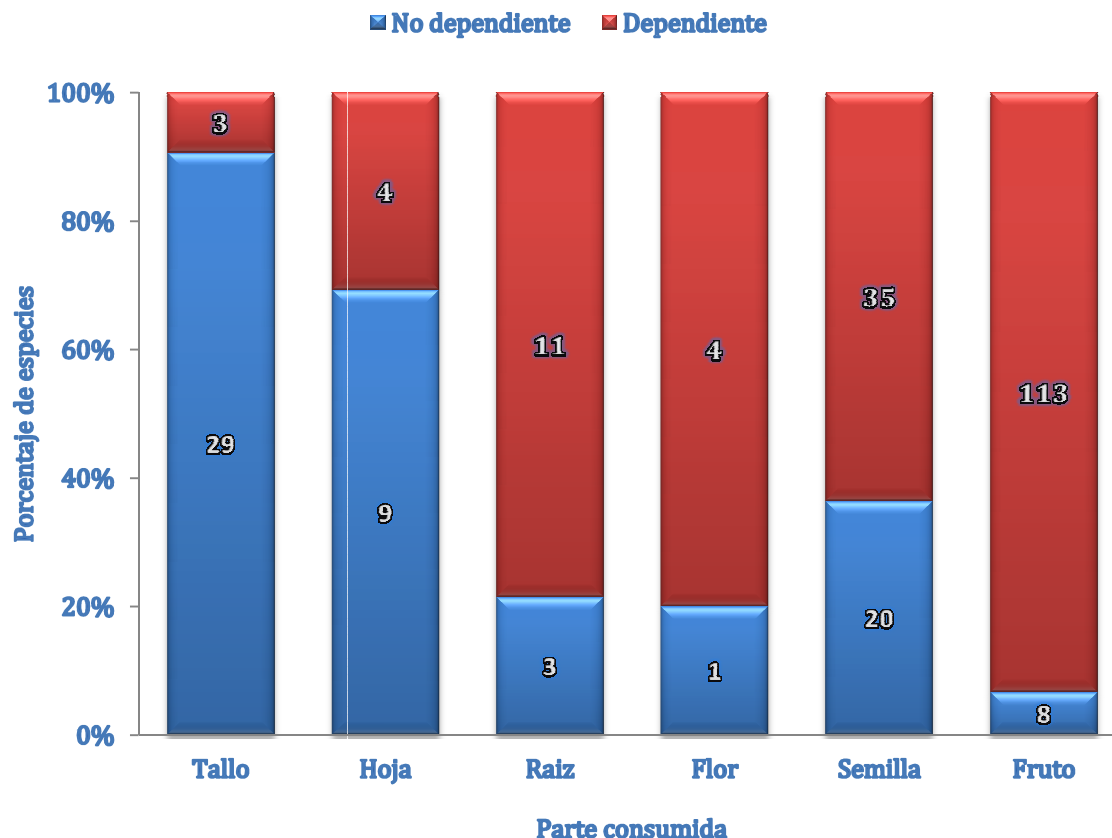


Figura 5. Dependencia de polinizadores de especies de plantas comestibles en México cuya parte comestible depende directamente (frutos y semillas) o indirectamente (tallos, hojas, raíces y flores) de la polinización. Los números insertos en las barras indican el número de especies.

De acuerdo a su uso principal por categorías, se encontró que, en promedio, el 86% de las plantas incluidas en las categorías de aceites, condimentos, estimulantes, frutos, legumbres, raíces y vegetales dependen de los polinizadores, mientras que de las plantas incluidas en las categorías de azúcares, bebidas, cereales y frutos secos, en promedio sólo el 14% de las especies dependen de los polinizadores (Figura 6).

2.2 Producción anual de plantas cultivadas

A partir de la base de datos del Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON 2010; <http://www.siap.gob.mx>), se emplearon medidas relativas a la producción anual de cultivos de consumo humano, incluyendo superficie sembrada, superficie cosechada, volumen

de producción y precio medio rural. Dichas medidas fueron utilizadas para comparar la producción de especies cultivadas dependientes y no dependientes de polinizadores, por medio de seis indicadores: (1) superficie total sembrada; (2) superficie total cosechada; (3) volumen total producido; (4) rendimiento promedio; (5) valor promedio de producción por área; y (6) valor total de producción.

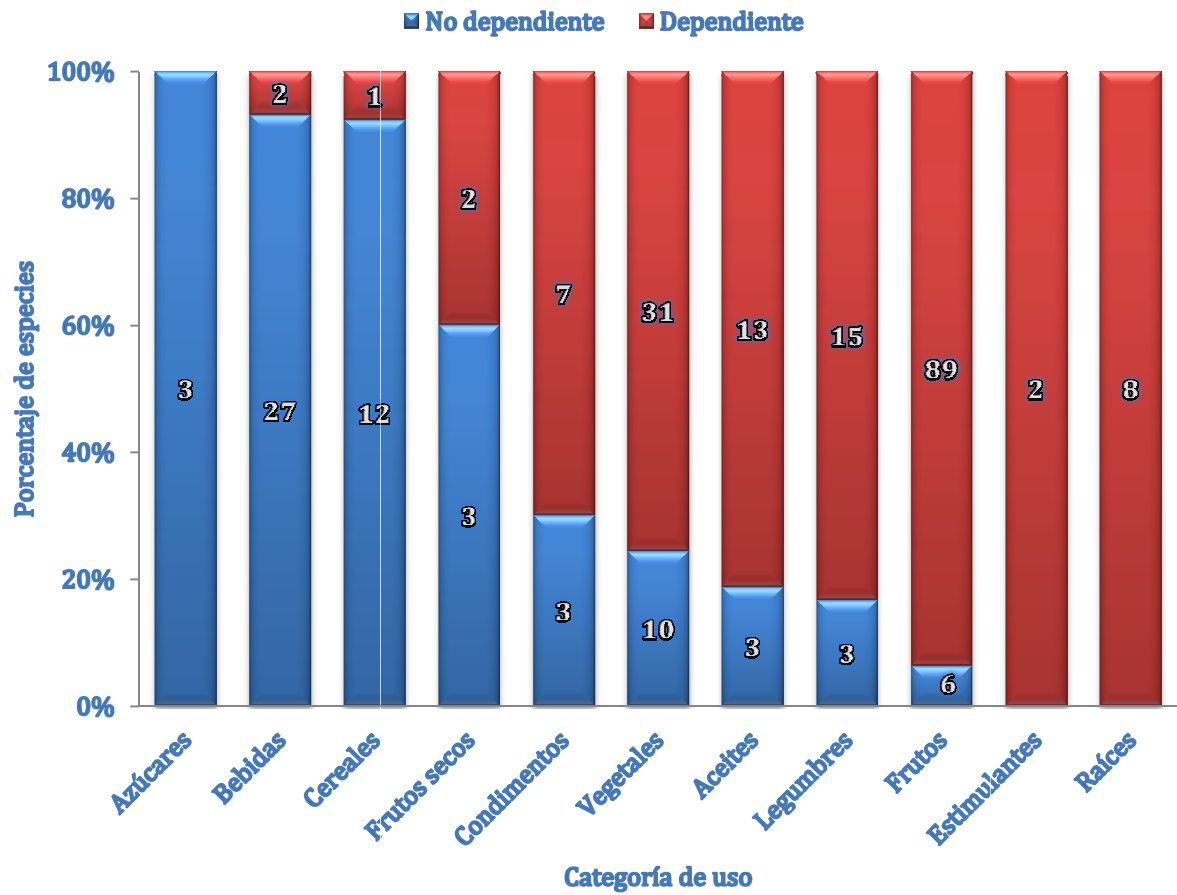


Figura 6. Dependencia de polinizadores de especies de plantas comestibles en México por categoría de uso. Los números insertos en las barras indican el número de especies.

Para el año 2010, se pudieron estimar los seis indicadores de producción para 189 especies, de las cuales existía información sobre la dependencia de polinizadores para 164 especies (Tablas 2a y 2b; Apéndice 1). La superficie total cosechada en el país en el 2010 fue de 13.8 millones de hectáreas. Cabe mencionar que el maíz representa el 52% del total de la superficie cosechada y el 26% del valor total de la producción de las 189 plantas cultivadas en

México. Excluyendo al maíz, la superficie total cosechada a nivel nacional de las plantas no dependientes, se reduce en 78% (7.2×10^6 ha), mientras que el valor total de producción solo se reduce un 29% (23.9 millones de pesos). Es importante señalar que aunque la mayoría de la superficie cultivada (73%) proviene de cultivos de temporada (i.e. cultivos que dependen exclusivamente de las lluvias), más de la mitad del valor de producción a nivel nacional (58%) proviene de cultivos de riego.

Tabla 2. Valores de producción de cultivos dependientes y no dependientes de polinizadores cuyo producto consumido depende **(a)** directa o **(b)** indirectamente de la polinización. Valores relativos en México para el 2010 provenientes de SIACON.

a

Dependencia directa	Plantas dependientes	Plantas no dependientes	Total ¹
2010	104 especies	22 especies	133 especies
Superficie total sembrada (ha) 10^6	4.7	9.2	14.0
Superficie total cosechada (ha) 10^6	4.3	8.4	12.8
Volumen total producido (ton) 10^6	23.1	29.1	52.3
Rendimiento promedio (ton/ha)	11.4	3.4	9.7
Valor promedio de producción por área (MEX\$/ha) 10^3	64.5	41.9	59.3
Valor total de producción (MEX\$) 10^9	104.2	85.9	194.2
Valor total de producción por exportación (MEX\$) 10^9	23.2 (n=13)	6.0 (n=4)	29.2(n=17)

b

Dependencia indirecta	Plantas dependientes	Plantas no dependientes	Total ¹
2010	18 especies	20 especies	56 especies
Superficie total sembrada (ha) 10^6	0.2	1.0	1.2
Superficie total cosechada (ha) 10^6	0.2	0.8	1.0
Volumen total producido (ton) 10^6	4.7	54.1	59.0
Rendimiento promedio (ton/ha)	18.9	29.0	19.7
Valor promedio de producción por área (MEX\$/ha) 10^3	78.9	75.9	69.8
Valor total de producción (MEX\$) 10^9	24.0	40.2	65.2
Valor total de producción por exportación (MEX\$) 10^9	0.01(n=1)	18.8 (n=2)	18.8 (n=3)

¹ Se consideran plantas dependientes, no dependientes de polinizadores y plantas sin información sobre dependencia de polinizadores pero con información sobre producción al 2010.

Considerando solamente aquellos cultivos que dependen directamente de la polinización, encontramos que a pesar de haber 4.7 veces más especies dependientes de polinizadores que de especies no dependientes, la superficie total cosechada de plantas dependientes es 1.9 veces menor que el de las plantas no dependientes (Tabla 2a). Asimismo, la superficie promedio cosechada por especies dependientes de polinizadores es 9 veces menor que la superficie promedio cosechada por especies no dependientes (46.5×10^3 vs. 420.1×10^3 ha/especie, respectivamente). El patrón opuesto es observado con el volumen promedio producido por hectárea y el valor promedio de producción por hectárea que es 3.4 y 1.5 veces mayor, respectivamente, en las plantas dependientes que en las no dependientes; lo cual concuerda con lo encontrado por Gallai y colaboradores a nivel mundial [5], por Chacoff y colaboradores en Argentina [4] y por Ashworth y colaboradores en México [3]. Estos resultados ponen en evidencia dos aspectos muy relevantes; por un lado, los cultivos dependientes de polinizadores permiten obtener mayor cantidad de alimento por unidad de superficie y, por otro lado, generan una mayor ganancia económica por unidad de área que los cultivos no dependientes de polinizadores. Es decir, desde el punto de vista productivo y económico, las plantas dependientes de polinizadores son más redituables. Por ejemplo, la planta no dependiente con mayor valor total de producción en México, el maíz, tiene una producción de 3.3 ton/ha, con un valor promedio de producción de 9.1 mil pesos ha/año; mientras que la planta dependiente con mayor valor total de producción, el aguacate tiene una producción de 9.0 ton/ha, con un valor promedio de producción de 115 mil pesos ha/año. No obstante, hay que considerar que de las plantas que consumimos frutos y/o semillas, el 67% de las especies dependientes de polinizadores son de vida larga (ej. árboles y arbustos), mientras que el 60% de las no dependientes de polinizadores de las que consumimos frutos y/o semillas son de vida relativamente más corta (ej. hierbas; Figura 7). Por lo tanto, en general, al inicio de la siembra se requiere de mayor tiempo en los cultivos dependientes que en los no dependientes para obtener ganancias económicas; aunque una vez alcanzada su etapa reproductiva, la producción se puede mantener continua.

Considerando aquellos alimentos que dependen indirectamente de la polinización, la superficie total cosechada por las plantas dependientes es dos veces menor que el de las plantas no dependientes (Tabla 2b). Contrariamente a lo ocurrido en los alimentos que dependen directamente de la polinización, en estos cultivos el volumen promedio producido por hectárea en las plantas dependientes es 1.5 veces menor que en las no dependientes. Sin embargo, el valor promedio de producción por hectárea es similar para ambos cultivos.

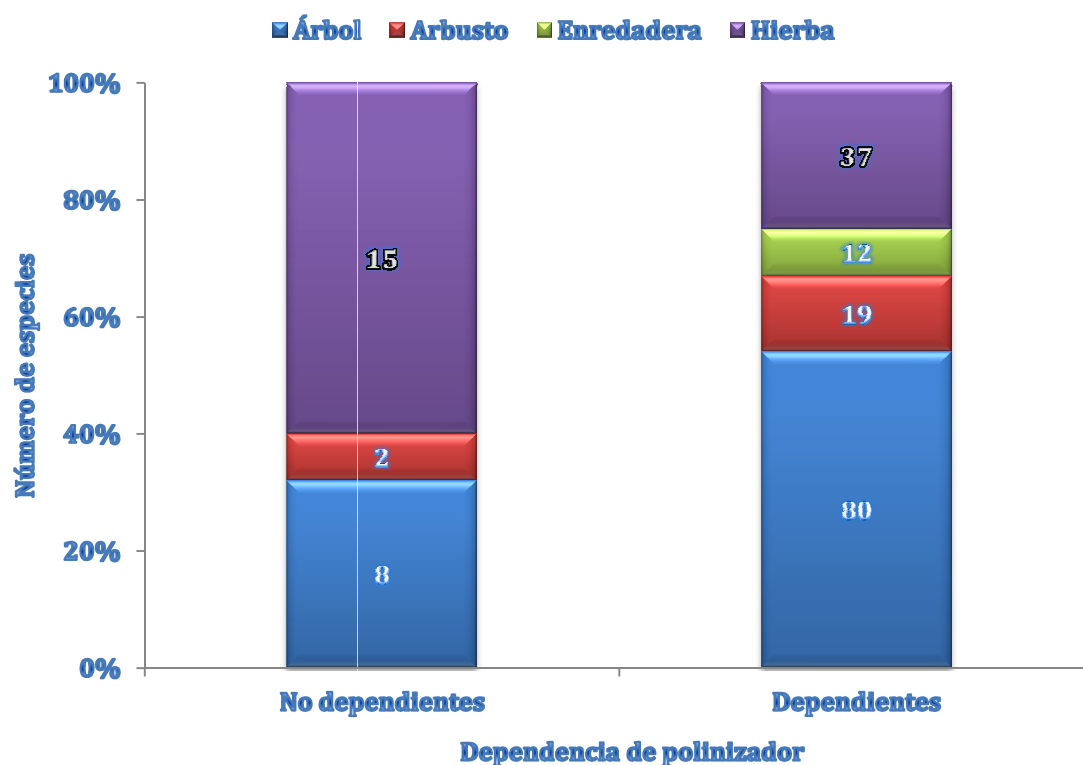


Figura 7. Forma de vida de las plantas cultivadas para consumo de frutos y/o semillas dependientes y no dependientes de polinizadores. Los números insertos en las barras indican el número de especies.

De acuerdo a su uso principal por categorías, los cereales son la categoría más cosechada en el país (60%), seguida por las legumbres (13%), los frutos (8%), los estimulantes (5%) y los azúcares (5%; Figura 8a). Sin embargo, los cultivos de azúcares son los que tienen el mayor volumen de producción (45%), seguido por los cereales (26%), los frutos (13%) y los vegetales (9%; Figura 8b). En términos de productividad, las categorías más productivas en volumen por unidad de área (ton/ha) en promedio, son (en orden descendente): azúcares (51.9 toneladas por hectárea), bebidas (31.4), raíces (20.4), vegetales (19.3), frutos (10.8), aceites (7.9), legumbres (5.7), cereales (4.0), condimentos (3.4) y frutos secos (1.7; Figura 9). Por otro lado, en términos de rentabilidad, las categorías más redituables por unidad de área (MEX\$/ha) en promedio, son (en orden descendente): vegetales (98 mil millones de pesos por hectárea), raíces (80), bebidas (70), frutos (70), azúcares (67), frutos secos (53), condimentos (29), legumbres (27), aceites (14), cereales (11) y estimulantes (8; Figura 9).

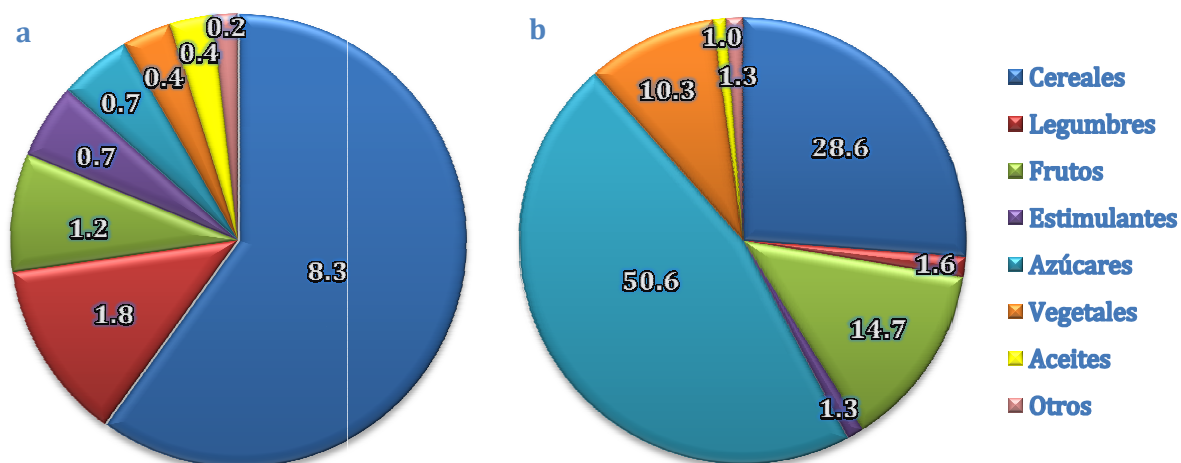


Figura 8. Proporción de (a) superficie cosechada; y (b) volumen producido por categoría de uso en México para el 2010. Los números insertos indican número de hectáreas cosechadas (10^6) y número de toneladas producidas (10^6) por categoría para la figura 8a y 8b, respectivamente. En categoría "otros" están consideradas las categorías de bebidas, condimentos, frutos secos y raíces.

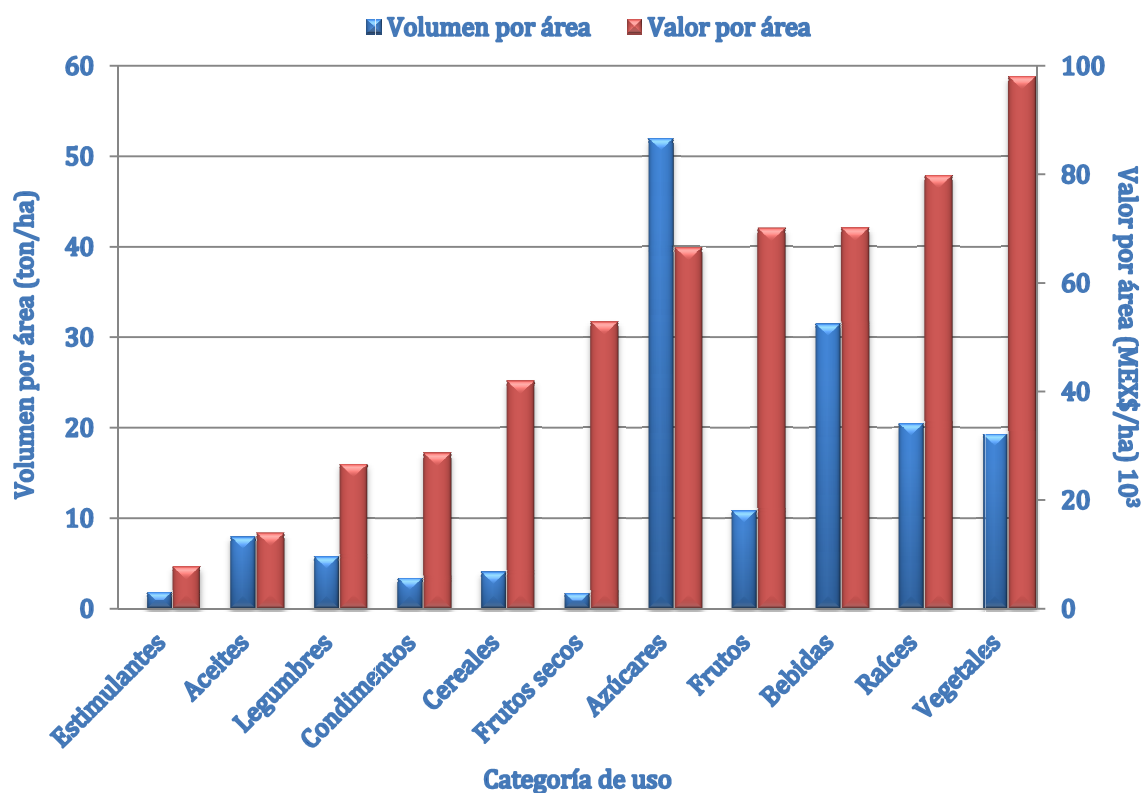


Figura 9. Volumen y valor de producción por unidad de área promedio por categoría de uso en México para el 2010.

2.3 Valor del servicio de polinización

Para poder determinar el valor económico de los polinizadores para cada cultivo dependiente de polinizadores y poder evaluar el impacto de la pérdida de polinizadores a nivel nacional, se utilizó la guía para valorar económicamente de servicios de polinización descrito por la FAO [106]. Para cada EPCA se investigó el nivel de dependencia cuantitativo a través de la literatura publicada en las bases de datos electrónicas anteriormente mencionadas. Dicha dependencia se calculó por la siguiente fórmula:

$$D = 1 - \frac{PE}{PA};$$

donde, D=grado de dependencia de polinizadores; PE=número de frutos o semillas derivada de la exclusión de visitantes florales (polinización autónoma) y PA=número de frutos o semillas derivada de polinización abierta (polinización facilitada por animales + polinización autónoma). Este valor de dependencia cuantitativa oscila de 0 a 1, siendo 1 total dependencia de polinizadores y 0, dependencia nula. A su vez, este valor se multiplica por el valor de producción del respectivo cultivo (obtenido en la sección 2.2), para estimar el valor económico de los polinizadores por cultivo. Este indicador del valor del polinizador, aunque ampliamente utilizado [ej. 1, 5, 6], presenta al menos dos limitaciones: (1) el valor de dependencia cuantitativa depende del lugar donde se realicen los tratamientos, ya que la densidad de polinizadores varía espacialmente; y (2) el nivel de polinización autónoma puede variar geográficamente y entre variedades de un mismo cultivo. Por tanto, es conveniente evaluar el valor del polinizador específicamente para la variedad del cultivo y el sitio donde se encuentra sembrado el cultivo.

Se pudo estimar el valor económico del servicio de polinización de 103 especies de cultivos (Tabla 3; Apéndice 1). El valor total del servicio del polinizador para el 2010 fue de 43 mil millones de pesos, lo cual corresponde al 43% del valor total de producción para cultivos dependientes en el 2010. Por otro lado, considerando tanto especies dependientes como no dependientes de polinizadores, el valor total del servicio del polinizador para el 2010 corresponde al 19% del valor total de producción. Esto contrasta con lo encontrado por Aizen y colaboradores[6] y Gallai y colaboradores a nivel mundial [5]; quienes reportan, respectivamente, una reducción del 3-8% y 9.5% de la producción agrícola en ausencia de polinizadores. Esta comparación pone en evidencia que las estimaciones globales de los

efectos de la pérdida de polinizadores en la producción agrícola pueden estar bastante alejadas de las realidades particulares de diferentes países. En el caso de México, la disminución de la producción agrícola por la disminución de polinizadores es el doble de lo estimado a nivel mundial

Tabla 3. Valor de producción de cultivos de consumo humano e importancia económica del servicio de polinización en México en el 2010.

	Cultivos dependientes	Total de cultivos
2010	67 especies	103 especies
Valor total de producción (MEX\$) 10 ⁹	100.5	224.4
Valor total del servicio de polinización (MEX\$) 10 ⁹	43.3	43.3
Valor del servicio de polinización (%)	43.1	19.3

De acuerdo a su uso principal por categorías, se encontró que el valor del servicio de polinización a nivel nacional para el 2010 para los 103 cultivos fue de 18 millones de pesos para la categoría de frutos secos, 132 millones para condimentos, 582 millones para aceites, 714 millones para raíces, 1,355 millones para legumbres, 5,382 millones para bebidas, 10,423 millones para vegetales y 24,694 millones para frutos (Figura 10).

La proporción entre el valor económico del polinizador y el valor total de producción por categoría, se considera como un estimador de vulnerabilidad. Por ejemplo, con los datos de la Figura 10, se puede concluir que las categorías más vulnerables a la pérdida del servicio de polinizador son las de raíces y frutos; mientras que las categorías de cereales, legumbres y condimentos serían las menos vulnerables. Sin embargo, debido al pequeño número de especies en las categorías de raíces, bebidas y frutos secos (<4 especies), dicha vulnerabilidad se debe considerar con cautela en estas categorías. El valor del polinizador de los 20 cultivos dependientes de polinizadores más importantes económicamente en México oscila desde 130 millones de pesos anuales para la papaya, hasta 11 mil millones de pesos anuales para el aguacate (Figura 11). En promedio, el 49% del valor de producción total de estos veinte cultivos es adjudicado al servicio prestado por los polinizadores; aunque en algunos cultivos, tales como el aguacate, la sandía, el melón, la calabaza y el brócoli, la importancia del polinizador es superior al 80%. De igual manera, considerando los 67 cultivos dependientes para los que se obtuvo la dependencia cuantitativa del polinizador, en promedio el 50% del valor de producción es atribuible a los polinizadores.

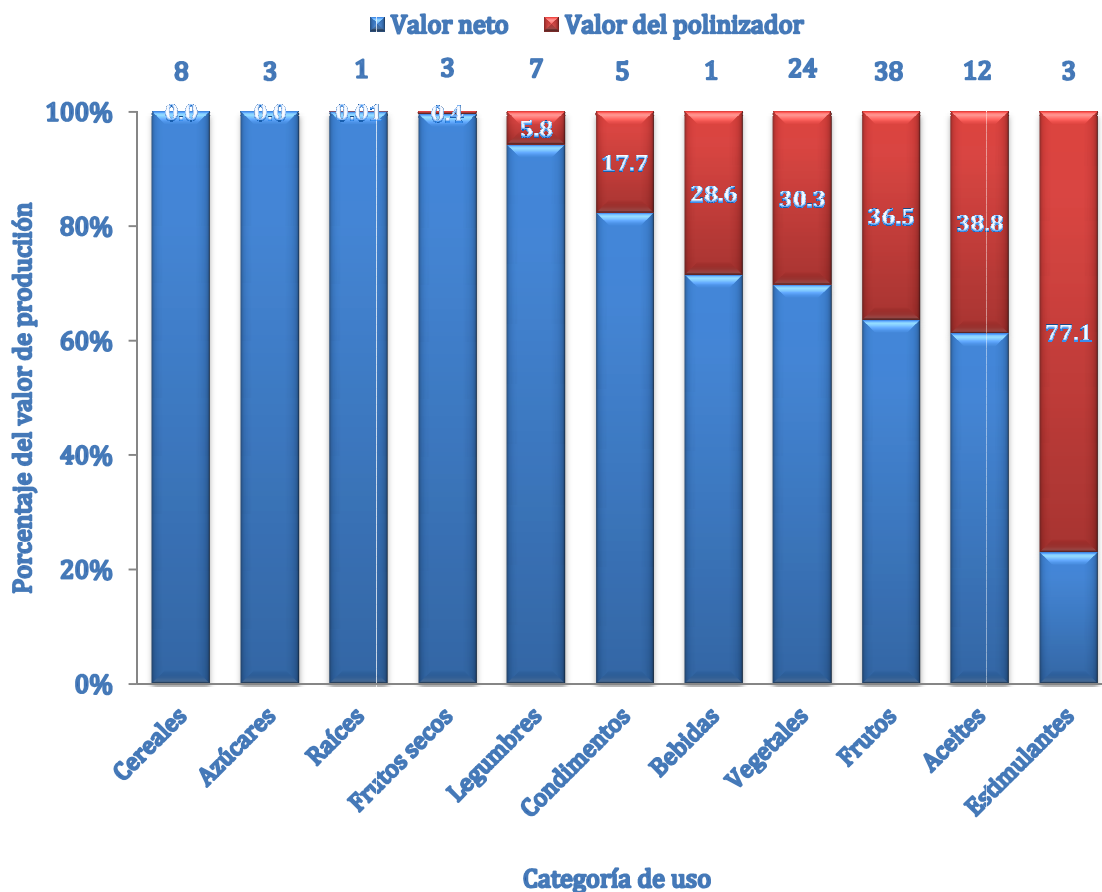


Figura 10. Valor total de producción y del servicio de polinización para cultivos dependientes de polinizadores por categoría de uso en México. Los números dentro y sobre las barras indican respectivamente, el índice de vulnerabilidad a la pérdida de polinizadores (en porcentaje) y las especies consideradas.

Es importante resaltar que, aunque en muchas especies de cultivos, el nivel de dependencia cuantitativa hacia el polinizador sea baja (i.e. el número de frutos producidos exclusivamente por los polinizadores es similar a los producidos por polinización autónoma o apomixis), la calidad del fruto o la cantidad de semillas producidas exclusivamente por los polinizadores muchas veces es mayor. Por ejemplo, en el pepino y el pimiento morrón se ha reportado significativamente un mayor peso y tamaño en los frutos provenientes de flores expuestas a los polinizadores en comparación con el de frutos provenientes de flores con exclusión de polinizadores [107, 108]. Asimismo, se ha encontrado una mayor cantidad de semillas en frutos de flores expuestas a los polinizadores que en frutos de flores con exclusión de polinizadores jitomate [109]. Debido a que el tamaño y el peso influyen invariablemente en

el precio y calidad de los frutos, el valor del polinizador es subestimado del valor total de producción de muchos cultivos. Aunque el número de semillas probablemente no influya en el precio del fruto (aunque si en las legumbres, por ejemplo), la cantidad/calidad de semillas es importante para siembras posteriores.

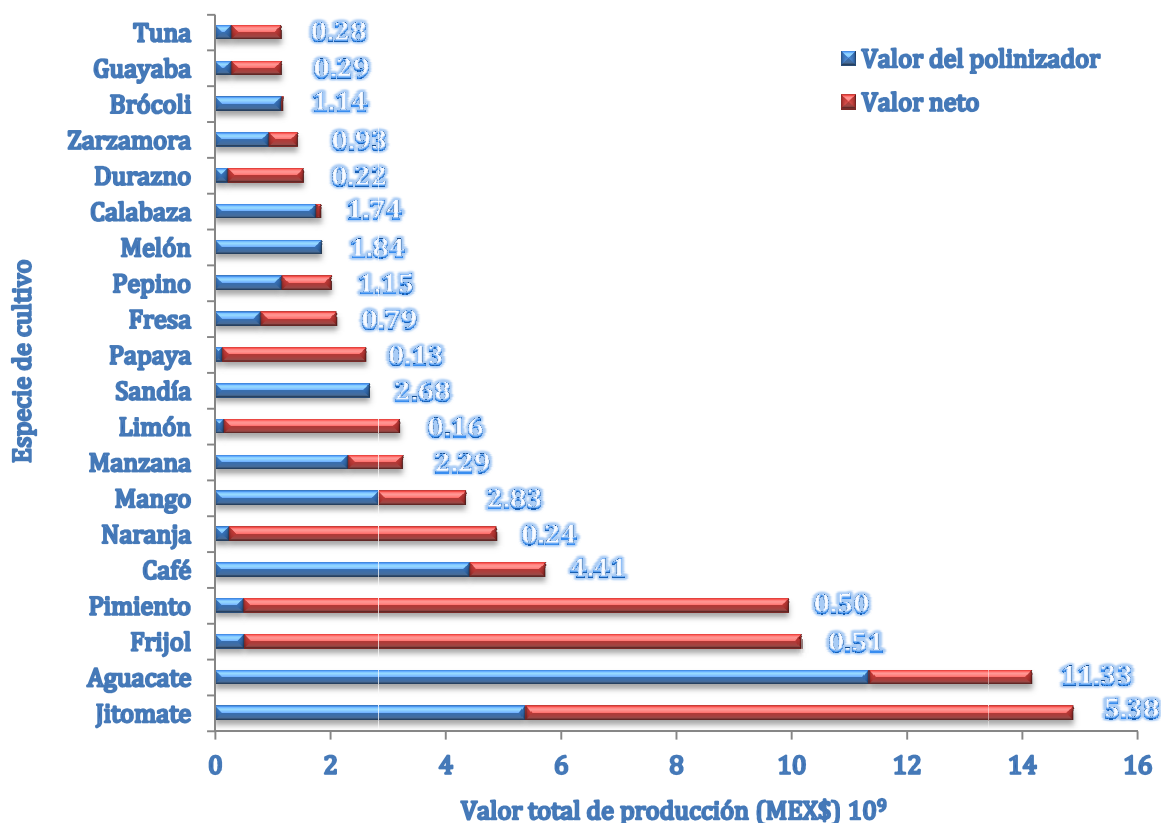


Figura 11. Importancia económica del servicio de polinización para los 20 cultivos dependientes de polinizadores con mayor valor total de producción de México al 2010. Los números del lado derecho de las barras indican la importancia económica del polinizador en miles de millones de pesos.

En conclusión, los polinizadores no solo contribuyen a una mejor calidad y mayor cantidad de frutos o semillas, si no también maximizan el volumen de producción y los ingresos por hectárea del 86% de los cultivos productores de frutos y semillas y del 34% de los cultivos que dependen indirectamente de la polinización. En particular, los polinizadores son responsables del 43% de los ingresos provenientes de los cultivos dependientes de polinizadores. No obstante, estas cifras probablemente subestiman la importancia de los polinizadores a nivel nacional, ya que se desconoce el nivel de dependencia de polinizadores en el 44% de las EPCA. Aunado a esto, se desconocen los niveles de producción de casi la

mitad de las EPCA, las cuales en su mayoría son cosechadas en su estado silvestre y muy probablemente la dependencia de polinizadores nativos sea muy grande. Por tanto, los servicios prestados por los polinizadores silvestres seguramente son muy importantes para la alimentación y el ingreso económico de gente que depende de la producción de especies cosechadas en estado silvestre o de especies cultivadas dependientes. Aunado a esto, la ausencia de polinizadores también puede disminuir la cantidad de nutrimentos en nuestras dietas. Un estudio en Argentina, estima un déficit de 20% en proteínas y de 25% en grasas en ausencia de polinizadores [4], mientras que una revisión a nivel global estimó que más del 90% de la producción de vitamina C proviene de cultivos dependientes, los cuales además, son la principal fuente de producción de vitamina A, antioxidantes y ácido fólico, entre otros nutrientes esenciales para un buen desarrollo y calidad de vida [110].

2.4 Especies de polinizadores de plantas comestibles

Para determinar las especies de polinizadores de los cultivos en México, se buscó información en las bases de datos electrónicas anteriormente mencionadas, así como en reportes y memorias de congresos. En general, existen muy pocos estudios que documenten los polinizadores o visitantes florales nativos de las especies de cultivos en México, por lo que esta información se complementó con estudios realizados en otras partes del mundo. Se encontró información sobre el sistema de polinización de 144 especies de plantas comestibles, de las cuales se pudo obtener información a nivel genérico/específico de 111 especies de plantas, resultando en al menos 237 especies de polinizadores (Apéndice 2). Las abejas son el sistema de polinización predominante en estas 144 especies (78%), seguido por las moscas (14%), viento (13%), murciélagos (10%) y aves (8%), entre otros (Figura 12).

Entre los géneros mejor representados en la base de datos de polinizadores se encuentran *Apis* (visita el 58% de los cultivos), *Bombus* (21%) y algunos géneros de la tribu Meliponini de abejas sin aguijón (*i.e.* *Trigona*, *Melipona*, *Scaptotrigona* y *Partamona*). Las abejas de la tribu Meliponini son un grupo importante de polinizadores de cultivos en los trópicos y considerando todas las especies representadas en la base de datos de esta tribu, visitan el 21% de las 144 especies de cultivos con información sobre polinizadores. En conjunto, las abejas del género *Apis*, *Bombus* y la tribu Meliponini, visitan el 63% de las especies de cultivos (Figura 13).

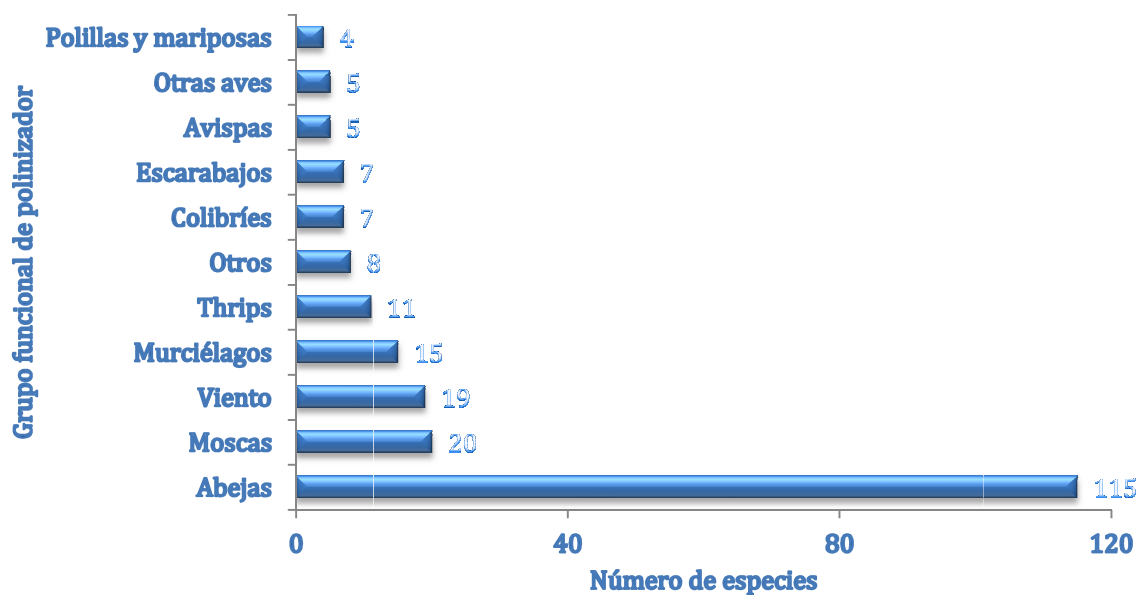


Figura 12. Grupo funcional de polinizadores de 144 especies de plantas comestibles en México. Cuarenta y seis especies de plantas fueron visitadas o polinizadas por más de un grupo funcional y aparecen representadas más de una vez en esta gráfica. En categoría “otros” están incluidos diversos insectos no especificados por los autores. Los números del lado derecho de las barras indican el número de especies de plantas para los que se encontró información sobre sus polinizadores.



Figura 13. Géneros representativos de polinizadores de especies de plantas comestibles en México. Todos los géneros pertenecen a abejas, excepto *Eristalis* que pertenece a moscas. Los números arriba de las barras indican el número de especies de cultivos visitados o polinizados por cada género.

De las 112 especies de cultivos visitadas por abejas, 74 fueron visitadas exclusivamente por este grupo funcional. Las abejas son polinizadores de la mayor parte de los cultivos de dependencia directa del servicio de polinización, tanto de los cultivados a gran escala, pequeña escala o silvestres o manejados *in situ* (Figura 14). En particular, *Apis mellifera* visita el 46% de los 144 cultivos con datos de polinizadores. Muchos de estos cultivos son visitados también por otras especies de abejas y hay una importante proporción de los cultivos visitados por abejas que no han sido registrados con visitas de *Apis mellifera*, tanto de dependencia directa como de dependencia indirecta, por lo que su polinización depende de especies de abejas nativas. Para la mayor parte de las categorías de uso de los cultivos, un importante porcentaje del valor de su producción proviene del servicio de polinización, principalmente de las abejas (Figura 15).

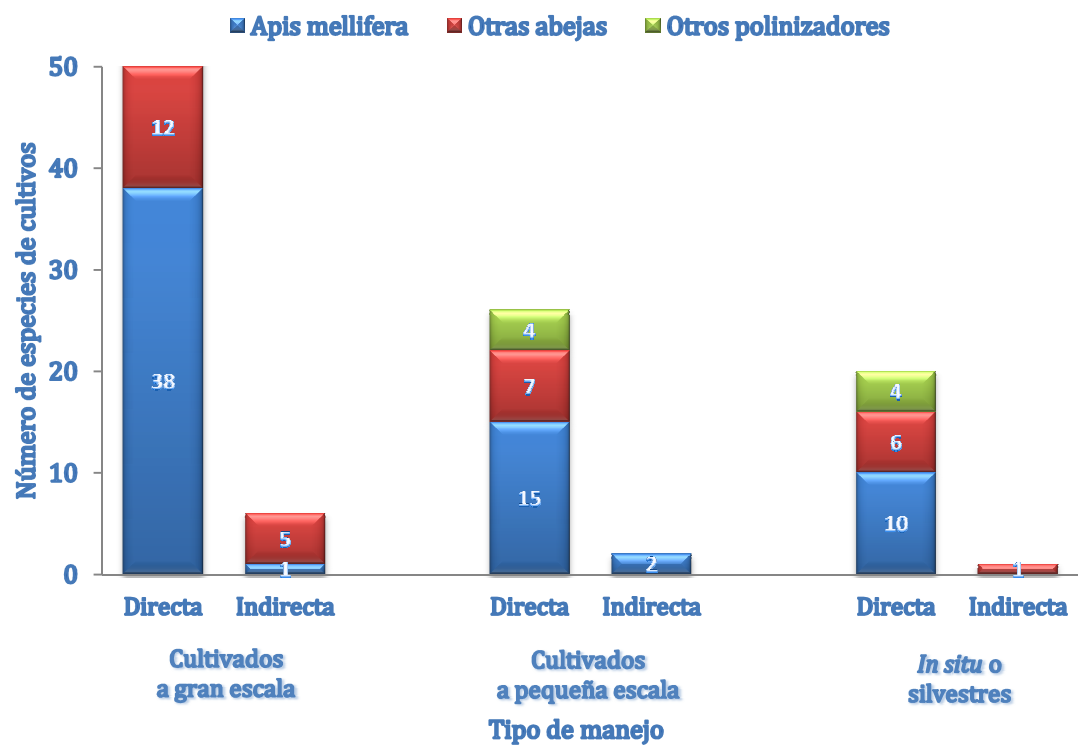


Figura 14. Número de especies de plantas comestibles en México polinizadas por abejas y otros tipos de polinizadores por tipo de manejo e importancia de la polinización en la producción (directa: frutos y semillas; indirecta: otras partes de la planta). En la categoría “*Apis mellifera*” son considerados los cultivos con registros de *Apis mellifera* entre otras especies de abejas. En la categoría “Otras abejas” son considerados los cultivos sin registros de *Apis mellifera*. En la categoría “Otros polinizadores” son considerados los cultivos que no tienen registros de abejas como polinizadores. Los números insertos en las barras indican el número de especies de cultivos consideradas.

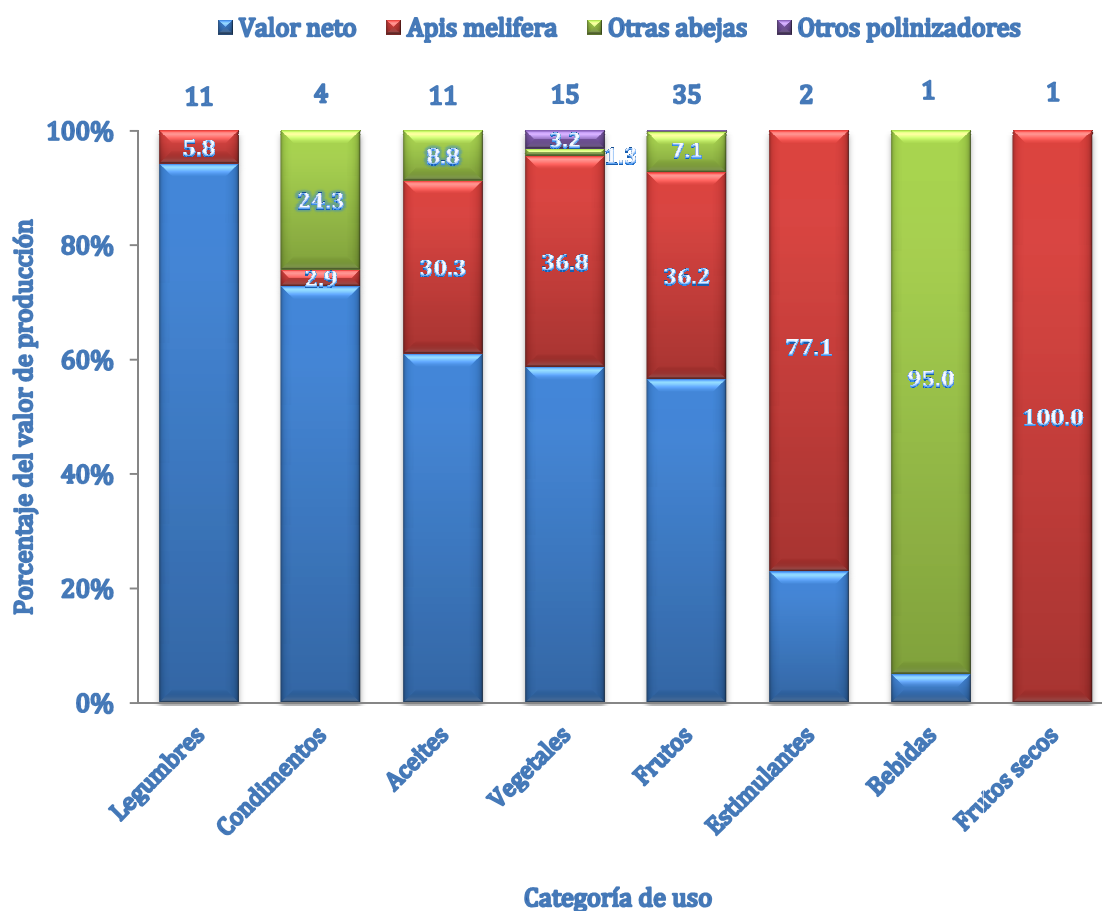


Figura 15. Porcentaje del valor total de producción atribuido al servicio de polinización para cultivos dependientes de polinizadores por categoría de uso y por tipo de polinizador. En la categoría “*Apis mellifera*” son considerados los cultivos con registros de *Apis mellifera* entre otras especies de abejas. En la categoría “Otras abejas” son considerados los cultivos sin registros de *Apis mellifera*. En la categoría “Otros polinizadores” son considerados los cultivos que no tienen registros de abejas como polinizadores. Los números insertos y arriba de las barras indican respectivamente, el índice de vulnerabilidad a la pérdida de polinizadores y las especies consideradas.

3. Escenarios por cambio climático en México al 2050

Debido a que se espera mayor decline de polinizadores en los trópicos que a mayores latitudes como consecuencia del cambio climático [61](ver sección 1.3), los agroecosistemas tropicales deberían ser los más afectados. Aunado a esto, más del 70% de la superficie cosechada en el 2010 en México es de cultivos de temporada, por lo que el clima es uno de los factores de riesgo más importantes en la agricultura y el cambio climático afectará, sin duda, la producción a nivel nacional.

En este estudio se generaron modelos de nicho climático actual (2010) y futuro (2050) tanto para las especies de polinizadores como para los cultivos, para poder predecir los posibles patrones de cambio que sufrirán éstos ante escenarios de cambio climático severo. Esto permitirá tener una visión global del efecto de cambio climático, el cambio de uso de suelo sobre la productividad agrícola dependiente de polinizadores y evaluar tendencias generales e impactos económicos potenciales del cambio climático sobre la producción agrícola en México. Este es el primer análisis de este tipo en el mundo.

3.1 Cambios potenciales en la distribución de cultivos y polinizadores

A partir de la lista de especies de plantas comestibles y de sus respectivos polinizadores, se recopiló información sobre la distribución de estas especies a través de la base de datos del GBIF (Global Biological Information Facility; <http://data.gbif.org/species>). Para cada una de las especies se eliminaron los registros duplicados y aquellos que se ubicaban dentro de un radio de 0.1° respecto a los vecinos más cercanos. Dicho procedimiento fue implementado con el fin de reducir los efectos posibles de la autocorrelación espacial en los modelos de distribución potencial. De forma complementaria, los registros fueron depurados con base en la distribución conocida de las especies y su rango altitudinal.

Se utilizó un modelaje de nicho ecológico para definir en términos de afinidad ambiental las zonas que están relacionadas con aquellas donde se distribuyen cada una de las especies de cultivos y de sus polinizadores respectivos. De igual forma, se identificaron las áreas de la distribución donde los patrones de presencia se reducen de forma significativa. Para esta labor fue utilizado el algoritmo de máxima entropía implementado en el programa MAXENT Versión 3.3.3a [111]. A partir de los puntos donde se registraron los individuos de las

diferentes especies y utilizando 19 indicadores climáticos propuestos por Hijmans [112], se modeló la distribución potencial de las especies para dos escenarios: (1) distribución potencial presente (promedio climático entre 1950-2000); y (2) distribución potencial futura (proyección para el año 2050 a partir del modelo de circulación de gases ukmo hadcm3). Dicha modelación fue implementada en cada especie usando el 25% de los puntos como una submuestra de corrida para calcular diferentes estimadores de calidad. El modelo fue evaluado usando el valor de AUC como método independiente de umbrales.

Finalmente, se realizaron mapas binomiales de distribución utilizando un umbral de corte común para todas las especies (percentil 10 de presencia). A partir de estos mapas de presencia y ausencia se estimó la extensión del área ocupada por la distribución potencial en las diferentes especies para cada uno de los escenarios evaluados.

A nivel nacional, se obtuvieron registros suficientes de presencia de 169 EPCA (95 cultivos y 74 especies manejadas) y de 46 especies de polinizadores (Apéndices 3 y 4). Considerando la extensión del área ocupada por la distribución actual y futura potencial de los EPCA, se espera que para el 2050, disminuya el área de 118 EPCA, mientras que se espera un aumento en el área con relación al área actual de 54 EPCA. De manera análoga, se espera que para el 2050, disminuya el área de distribución de 28 especies de polinizadores, mientras que se espera un aumento en el área de distribución de 20 especies. En promedio, se espera que la tasa de cambio de área en las plantas y polinizadores disminuya en 16% y 3%, respectivamente.

De las 98 especies cultivadas en pequeña y gran escala, se espera que en 70 cultivos (71%) su área sea reducida en promedio 45%; mientras que en 28 cultivos (29%) se espera un aumento promedio de 29% (Apéndice 1). En general, la población mexicana depende de alimentos sensibles al cambio climático para su subsistencia o para generar sus ingresos. Dentro de los diez cultivos en los que se espera una mayor tasa de reducción en su área de distribución debido al cambio climático, se encuentran tres de los cultivos más importantes económicamente para México en el 2010: el café, la papaya y la cebada (Figura 16). Por otro lado, dentro de los diez cultivos en los que se espera una mayor tasa de aumento, se encuentran tres de los cultivos más importantes económicamente para México en el 2010: el jitomate, la sandía y el pepino.

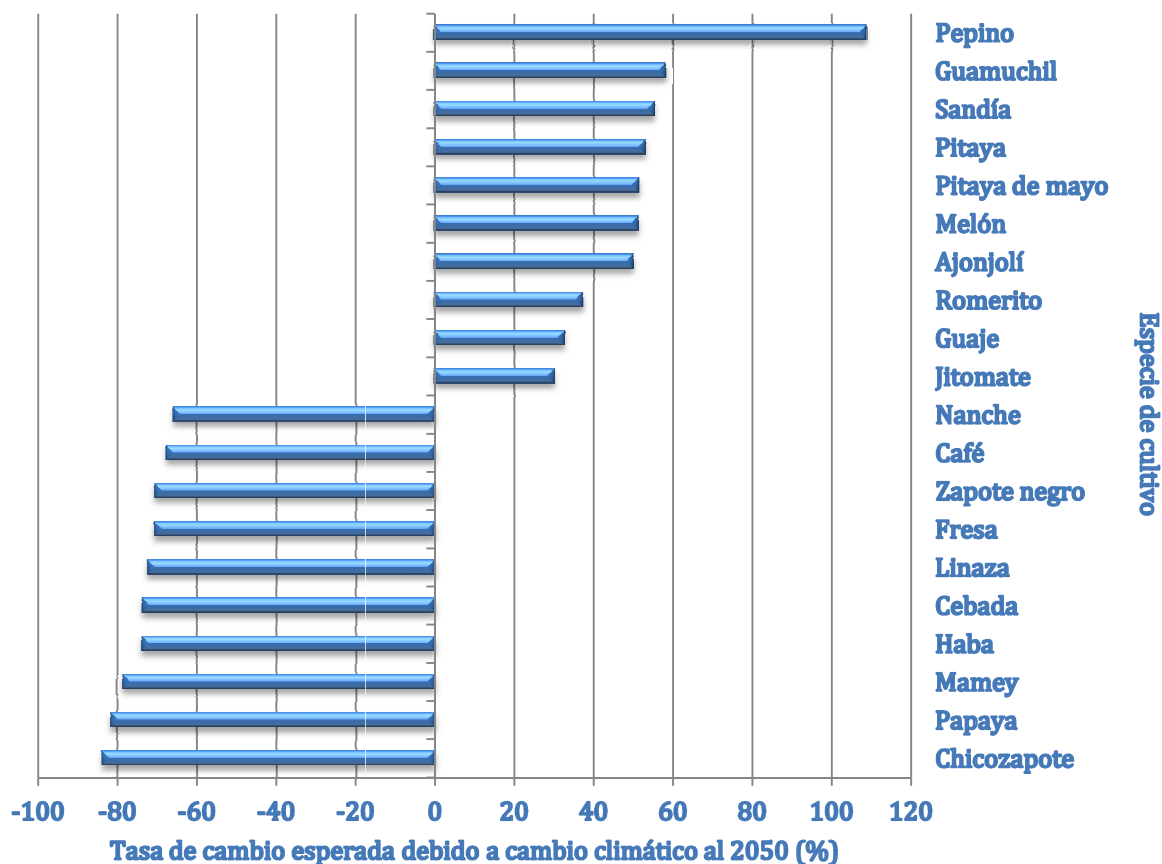


Figura 16. Tasas de cambio esperadas debido al cambio climático para el 2050 en el área de distribución de los 10 cultivos con mayor decremento y de los 10 cultivos con mayor incremento.

Dentro de las familias más representativas de cultivos, en general, se espera que solamente las especies de cultivos de las familias del pepino, la sandía y las calabazas (Cucurbitaceae) y de los nopales y pitayas (Cactaceae) sean favorecidas por el cambio climático. Por otro lado, se espera que las plantas de la familia de la fresa y durazno (Rosaceae), de la zanahoria y el cilantro (Apiaceae), de la caña de azúcar y el maíz (Poaceae) y de la hierbabuena y romero (Lamiaceae), sean las más susceptibles al cambio climático (Figura 17).

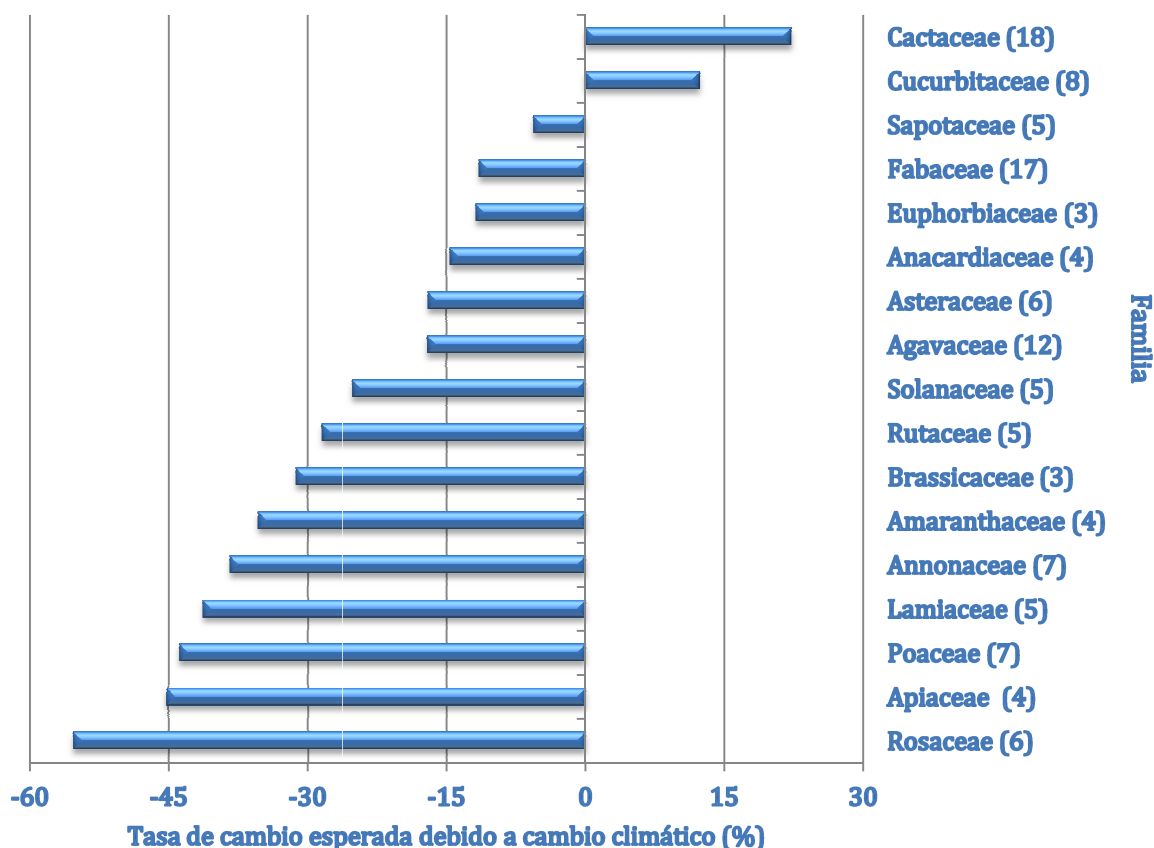


Figura 17. Tasas de cambio promedio esperadas debido al cambio climático para el 2050 en el área de distribución de los cultivos de las principales familias de plantas. Los números entre paréntesis indican el número de especies de cultivos pertenecientes a cada familia.

Dentro de los 20 cultivos más importantes económicamente para México en el 2010 para los que se encontró información sobre su tasa de cambio esperada para el 2050, el 65% presentará una disminución en su área de distribución, lo cual implicaría una menor producción con relación a la producción actual (Figura 18). Por lo tanto, en estos cultivos se deben implementar medidas para mitigar los efectos del cambio climático (ver sección 4). Por otro lado, en seis (30%) de estos cultivos se espera una mayor distribución de la que presenta actualmente y potencialmente una mayor producción dadas las condiciones climáticas predichas para el 2050.

aliz
 ña de azúcar
 tomate
 guacate
 pa
 ljol
 niento
 lgo
 fé
 bolla
 ranja
 ingo
 ndía
 paya
 mate
 párrago
 esa
 bada
 pino
 ña

Espece de cultivo

Figura 18. Tasa de cambio esperada debido al cambio climático para el 2050 en el área de distribución de los 20 cultivos más importantes económicamente (localizados de arriba hacia abajo) en México para el 2010. No se incluyeron los cultivos económicamente importantes de uva, nuez, manzana y limón por carecer de información para estimar la tasa de cambio.

De las 46 especies de polinizadores para los que se encontró información sobre su tasa de cambio esperada para el 2050, el 58% presentará una disminución en su área de distribución, lo cual provocaría una menor producción agrícola en EPCA dependientes de polinizadores en el futuro con relación a la producción actual (Figuras 19 y 20). En general, se espera un mayor decline en las especies de abejas de la familia Apidae y un aumento en las especies de abejas de la familia Halictidae y en los murciélagos nectarívoros, a excepción de *Choeroniscus godmani* (Figura 19).

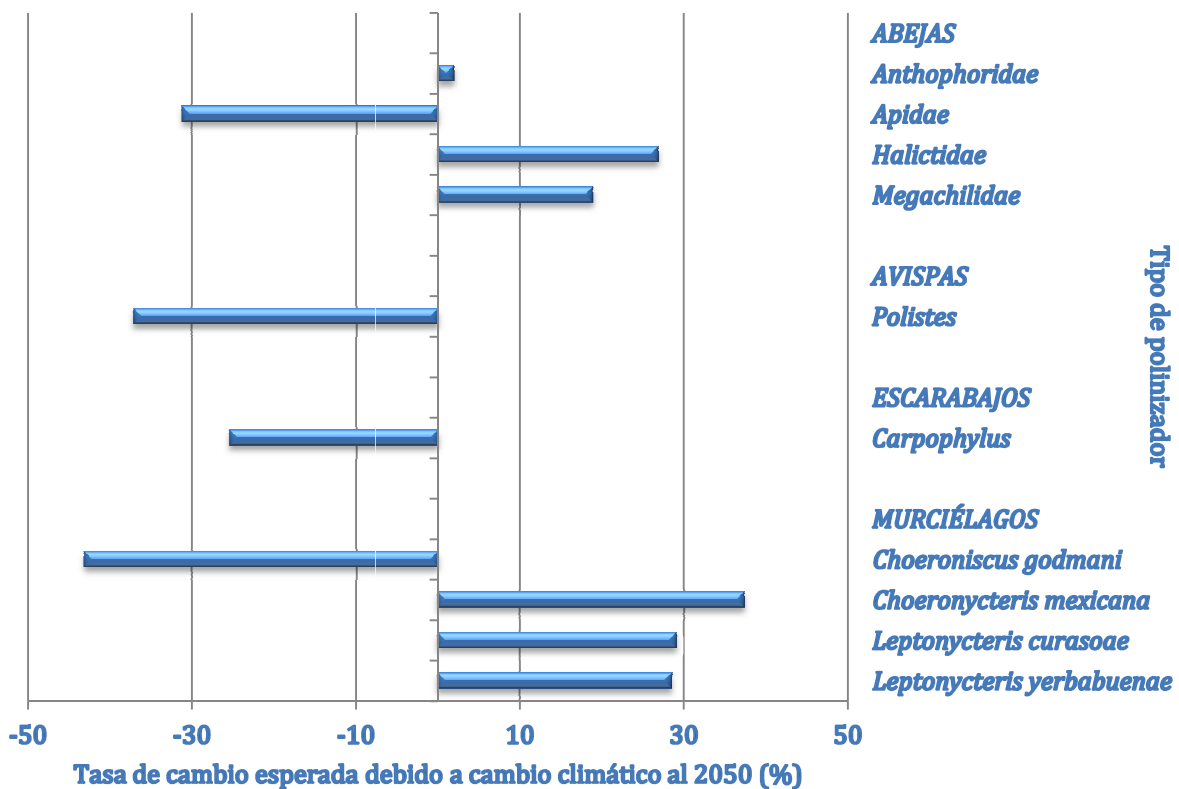


Figura 19. Tasas de cambio esperadas debido al cambio climático para el 2050 en el área de distribución de especies o grupos de especies de polinizadores de cultivos comestibles en México.

3.2 Zonas clave para cultivos y polinizadores

A partir de los mapas de distribución potencial de cada una de las especies de cultivos y polinizadores, se estimaron las áreas con mayor concentración de especies (traslape entre áreas) sumando las diferentes capas de distribución. Las zonas de mayor concentración de especies fueron comparadas entre los dos escenarios (2010 vs. 2050) para estimar las tasas de cambio en las áreas de distribución de las especies debidas al cambio climático (Figuras 21 y 22).

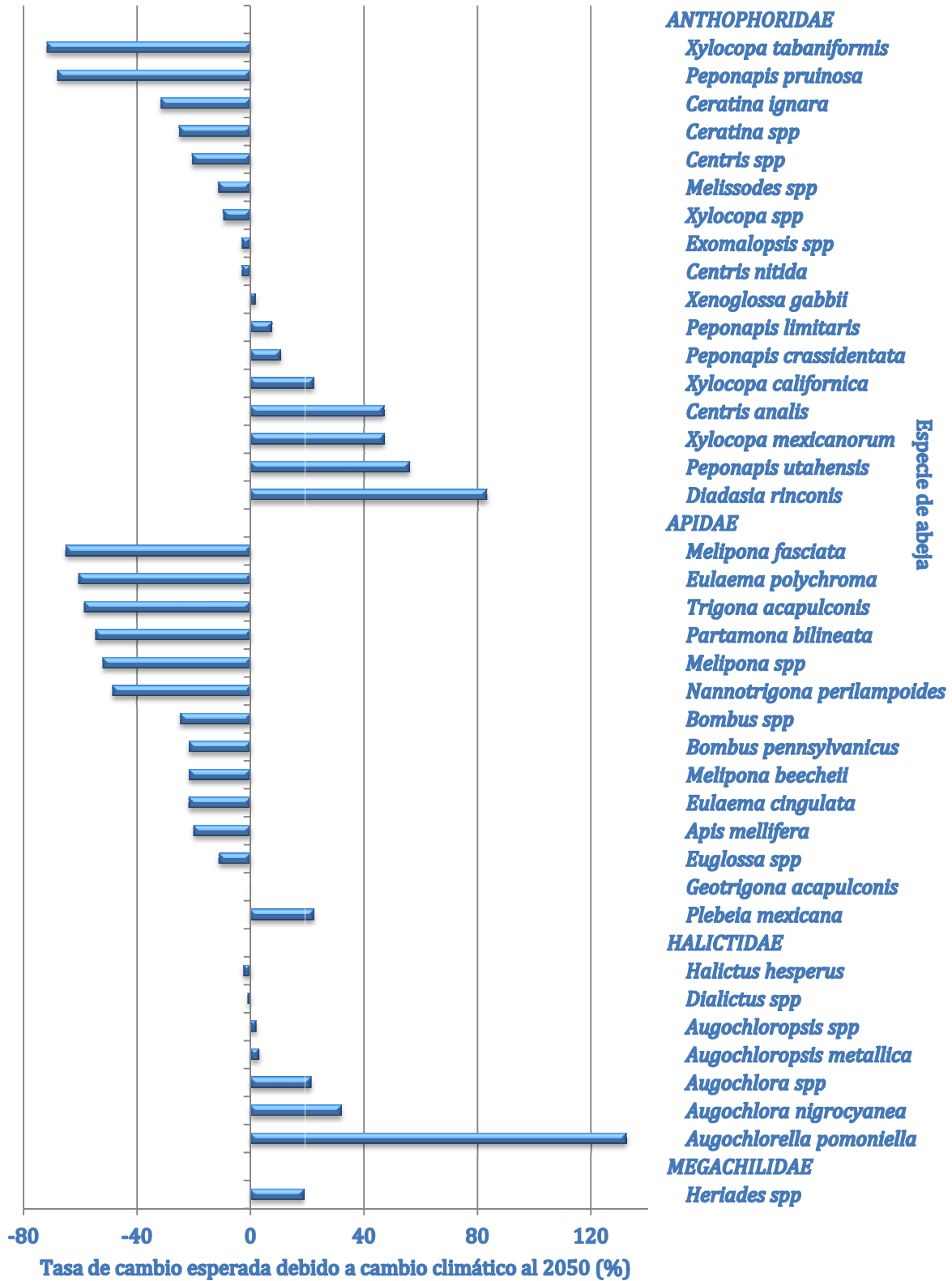


Figura 20. Tasas de cambio esperadas debido al cambio climático para el 2050 en el área de distribución de especies de abejas polinizadoras de cultivos comestibles en México.

Con relación a la distribución de las EPCA, encontramos que las zonas con mayor riqueza de especies en el 2010 están restringidas en la zona tropical del país, principalmente en el centro y sureste del país (en los estados de Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, México, Tlaxcala, Puebla, Distrito Federal, Morelos, Oaxaca y Chiapas). Por otro lado, en el norte del país es donde se registran menor número de EPCA, principalmente en los estados de Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila, Zacatecas, Durango, Sinaloa, Chihuahua, Sonora, Baja California y Baja California Sur (Figura 21a). Según el escenario de cambio climático al 2050, se esperarían disminuciones mayores en la riqueza de EPCA en el noreste del país, la depresión del Balsas, la llanura costera del Golfo y en gran parte de la costa del Pacífico sur. En particular, los estados donde se espera una mayor disminución es en Tamaulipas, norte de Nuevo León, noreste de Chihuahua, noroeste y sur de Sonora, centro y sur de Michoacán, sur de Guerrero, suroeste de Veracruz, gran parte de Tabasco, suroeste y norte de Campeche, centro de Yucatán. Por otro lado, se espera un aumento en la riqueza de EPCA en gran parte de Sinaloa y Chiapas, oeste de Durango, sur de Zacatecas y al este de Quintana Roo (Figura 21b).

De igual manera, en el 2010 se encuentran regiones de mayor riqueza de polinizadores en la región tropical, principalmente a lo largo del Eje Volcánico Transversal, Sierra Madre del Sur, Sierra Madre de Chiapas y el centro de México. Particularmente, las regiones de los estados con mayor riqueza de polinizadores son: oeste de Jalisco, noreste de Michoacán, México, Distrito Federal, Tlaxcala, sur de Puebla, Morelos, Guerrero, Oaxaca y Chiapas (Figura 22a). Al igual que en las plantas, según el escenario de cambio climático al 2050, se esperarían disminuciones en la riqueza de especies de polinizadores en el noreste del país, la depresión del Balsas, la llanura costera del Golfo y en gran parte de la costa del Pacífico sur; así como en la península de Yucatán. Particularmente, las regiones de los estados con mayor disminución en riqueza de polinizadores se espera serán Tamaulipas, norte de Nuevo León, norte de Chihuahua, gran parte de Sonora, Durango, Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Morelos y Tabasco, norte de Oaxaca, Yucatán, Campeche y Quintana Roo. A excepción del norte de Jalisco, Aguascalientes y el sur de Zacatecas, no se notan aumentos notables en la riqueza de polinizadores según el escenario del 2050 (Figura 22b).

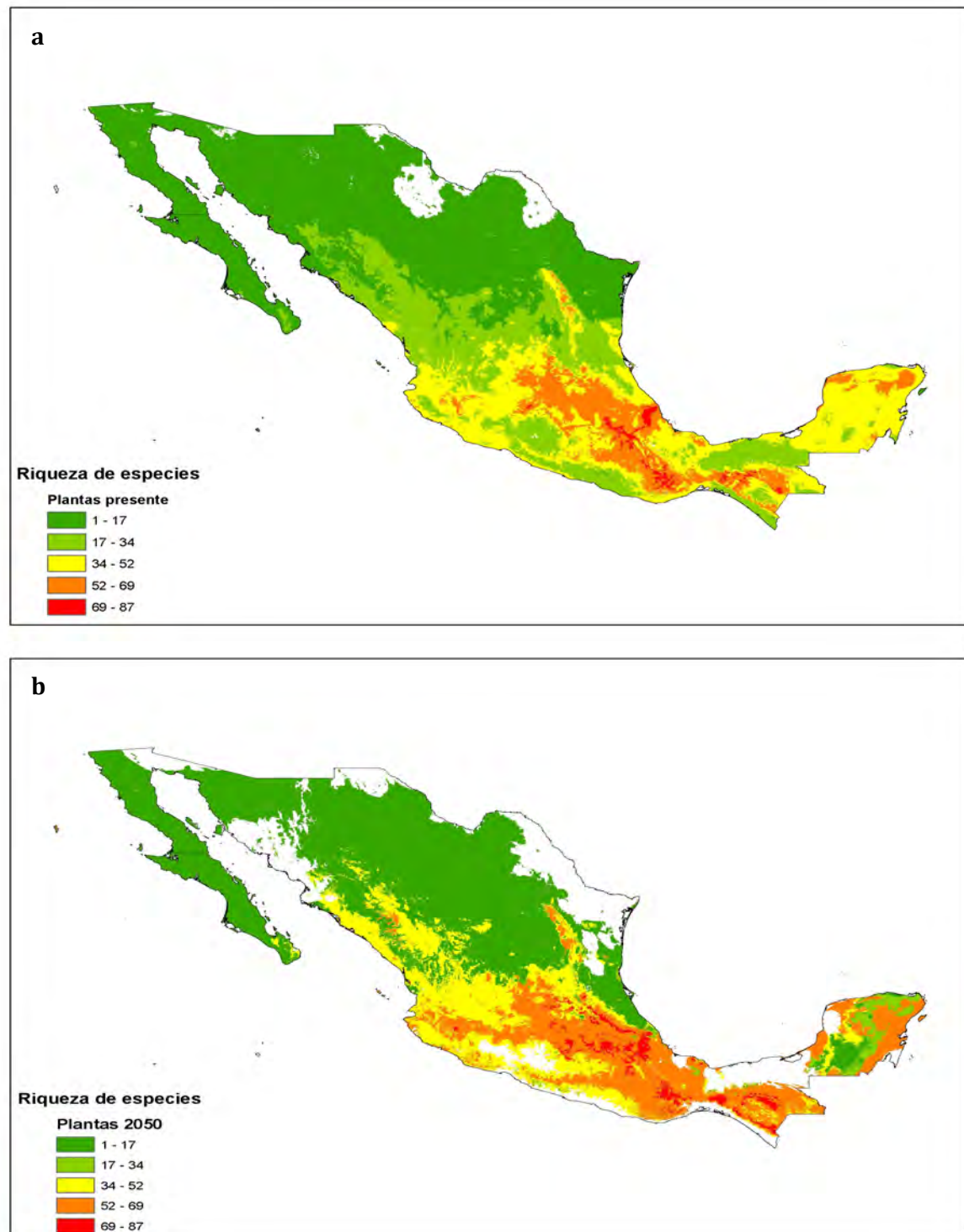


Figura 21. Cambios predichos en la riqueza de especies de plantas consumidas en México, según modelaje de nicho ecológico al (a) 2010 y (b) 2050 (según escenario extremo ukmo hadcm3). Distintos colores indican distinta riqueza de especies de acuerdo a la leyenda. Las regiones sin color indican ausencia de especies.

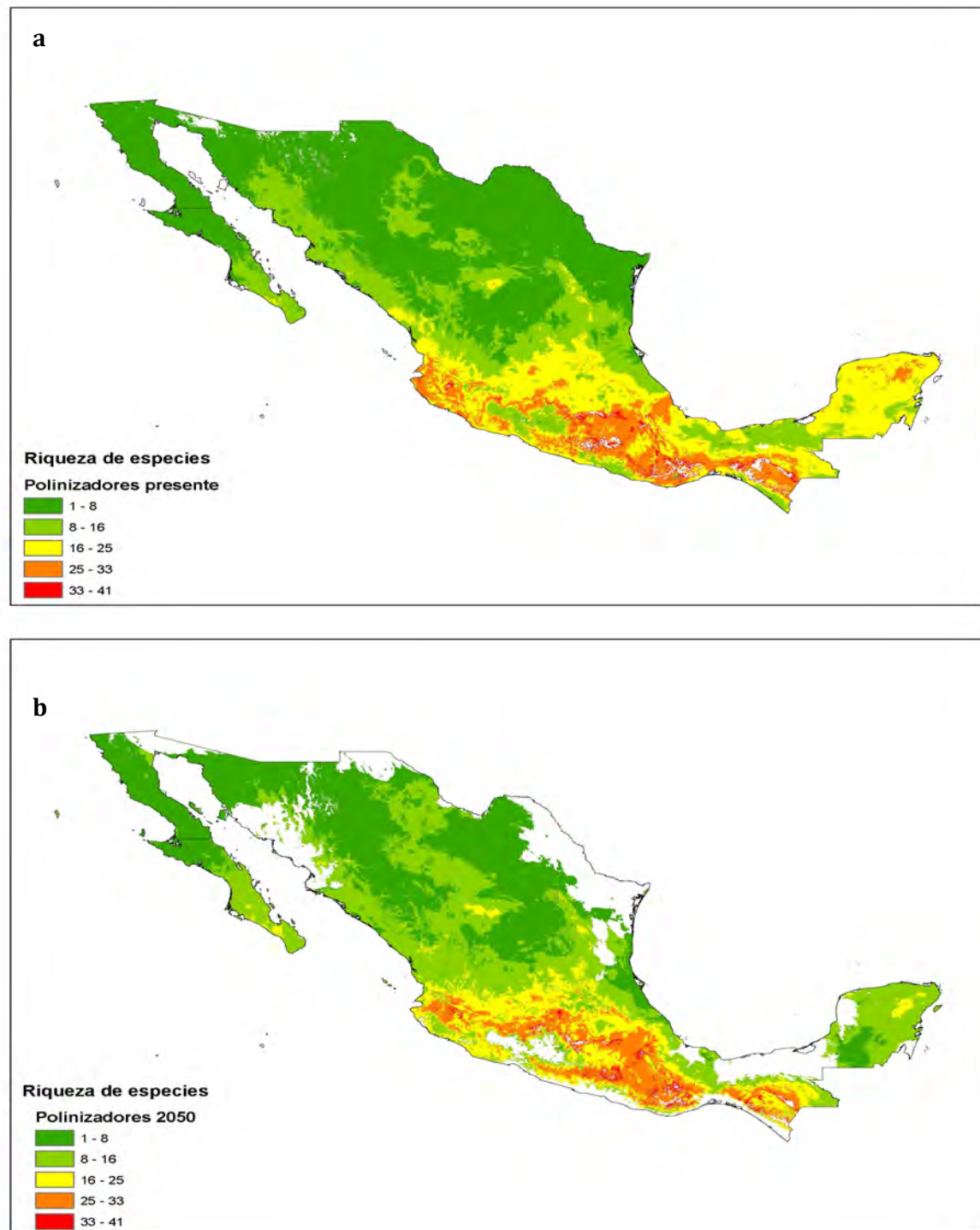


Figura 22. Cambios predichos en la riqueza de especies de polinizadores de plantas consumidas en México, según modelaje de nicho ecológico al (a) 2010 y (b) 2050 (según escenario extremo ukmo hadcm3). Distintos colores indican distinta riqueza de especies de acuerdo a la leyenda. Las regiones sin color indican ausencia de especies.

Al calcular las áreas de distribución de solapamiento de plantas, estimamos que para 2010 y 2050 habrá de 35 a 87 EPCA coexistiendo en el 33 y 37% del territorio mexicano, respectivamente. Por otro lado, se estima que habrá 2.9 veces más área sin EPCA en el 2050 que en el 2010 (Tabla 4).

Considerando las áreas de distribución de solapamiento de polinizadores, estimamos que para 2010 y 2050 habrá de 17 a 43 especies de polinizadores coexistiendo en el 31 y 36% del territorio mexicano, respectivamente. De manera similar que en las plantas, se estima que habrá 3.2 veces más área sin polinizadores en el 2050 que en el 2010 (Tabla 4).

Tabla 4. Tasas de cambio esperadas para el 2050 y áreas de distribución de 169 especies de plantas consumidas y de 46 especies de polinizadores en México por categoría de número de especies para el 2010 y el 2050.

Categoría (número de especies)	Área presente 2010 (%)	Área futura 2050 (%)	Tasa de cambio (%)
Plantas			
0	12,264,858 (6.3)	36,096,425 (18.5)	194.31
1-17	77,350,911 (39.6)	83,778,459 (43.0)	- 7.67
18-34	41,935,675 (21.5)	3,405,064 (1.7)	- 91.88
35-52	38,244,422 (19.6)	33,463,684 (17.2)	- 12.50
53-69	22,810,098 (11.7)	34,908,268 (17.9)	53.04
70-87	2,560,664 (1.3)	3,377,358 (1.7)	31.89
Polinizadores			
0	11,853,688 (6.1)	38,056,099 (19.5)	221.05
1-8	74,970,386 (38.7)	22,871,796 (11.7)	- 69.49
9-16	47,350,923 (24.4)	63,104,008 (32.4)	33.27
17-25	39,298,721 (20.3)	39,408,229 (20.2)	0.28
26-33	16,997,905 (8.8)	18,709,910 (9.6)	10.07
34-43	3,445,523 (1.8)	12,868,207 (6.6)	273.48

3.3 Impacto económico potencial debido al cambio climático en los cultivos

Para determinar la superficie total cosechada para cada cultivo esperada para el año 2050, se generaron los valores esperados de superficie cosechada para el 2050 según las tendencias lineales o geométricas de superficie cosechada del periodo 1980-2010 (SIACON 2010). Se utilizó la función tendencia de Excel que utiliza un criterio de mínimos cuadrados para

proyectar los valores que se ajustan a una línea de tendencia. Posteriormente, se multiplicó la superficie cosechada esperada por la tasa de cambio climático estimada anteriormente (ver sección 3.1). Cabe mencionar que la superficie cosechada esperada según la tendencia actual y sin considerar la tasa de cambio esperada por cambio climático, puede ser reflejo del efecto del cambio climático en la superficie cosechada registrada desde 1980 al 2010 o de los cambios experimentados por diferentes cultivos en los precios del mercado. También se debe considerar que las estimaciones de impacto económico asumen que el precio de los cultivos se mantiene constante a lo largo del tiempo. Aunque estas estimaciones tienen variación, reflejan el grado de impacto económico que se espera debido al cambio climático. Asimismo, ante el declive al parecer inminente de polinizadores, se espera que el precio de los cultivos dependientes aumente considerablemente, por lo cual, las estimaciones de pérdidas económicas muy probablemente están subestimadas.

Sin considerar la tasa de cambio modelada esperada por cambio climático y de seguir la tendencia actual, se espera que dejen de cosecharse para el 2050 al menos 42 especies de cultivos que actualmente se están cosechando (Tabla 5). Dicha tendencia a la baja podría ser consecuencia del cambio climático que ha ocurrido desde 1980 hasta el 2010, aunque no se pueden descartar aspectos de mercado.

Las familias de plantas con mayor proporción de especies con tendencia a la baja son: Annonaceae (67%), Rosaceae (57%), Sapotaceae (50%), Lamiaceae (38%) y Rutaceae (38%), lo cual concuerda con lo encontrado en las familias más susceptibles al cambio climático (Figura 17). Cabe destacar que el 30% y el 15%, respectivamente de las especies dependientes y no dependientes de polinizadores están dentro de estas especies susceptibles a dejar de cosecharse. Por tanto, al parecer las especies dependientes de polinizadores son el doble de susceptibles a desaparecer del mercado que las especies no dependientes de polinizadores, quizá por la evidencia creciente del declive en los polinizadores. Esto contrasta con lo reportado por Aizen y colaboradores [9], quienes encuentran tendencias similares en producción de cultivos dependientes y no dependientes de polinizadores a nivel mundial.

Hubo suficiente información para estimar la superficie total cosechada esperada para el 2050 considerando la tasa de cambio por cambio climático para 74 cultivos (Tablas 6a y 6b). En general, se espera un decremento promedio en la superficie de cosecha de 22%. Dentro de los alimentos con dependencia directa de la polinización, se espera una reducción en la superficie total cosechada de 14% y 27%, respectivamente para plantas dependientes y no

dependientes de polinizadores (Tabla 6a). De igual manera, se esperan grandes pérdidas económicas para el 2050, consecuencia de esta pérdida en superficie cosechada. Asumiendo que el precio medio rural del 2010 se mantiene en el 2050, se esperan pérdidas desde aproximadamente 21 mil millones de pesos anuales en plantas dependientes y alrededor de 18 mil millones de pesos anuales en plantas no dependientes de polinizadores. En promedio, se esperan 3.3 veces más pérdidas económicas en plantas no dependientes que en plantas dependientes de polinizadores con relación a la producción de frutos y semillas (Tabla 6a).

Tabla 5. Especies de cultivos que se espera dejen de cosecharse de seguir con la tendencia observada en el periodo 1980-2010.

Nombre común	Nombre científico	Nombre común	Nombre científico
Dependientes		Dependientes	
Ajonjolí	<i>Sesamum indicum</i>	Limón real	<i>Citrus x limón</i>
Almendra	<i>Prunus dulcis</i>	Linaza, lino	<i>Linum usitatissimum</i>
Anona, saramuyo	<i>Annona squamosa</i>	Mamey	<i>Pouteria sapota</i>
Arándano	<i>Vaccinium</i> sp.	Membrillo	<i>Cydonia oblonga</i>
Arrayán	<i>Myrceugenella apiculata</i>	Mostaza	<i>Sinapis alba</i>
Arvejón	<i>Vicia</i> sp.	Níspero	<i>Eriobotrya japonica</i>
Caimito	<i>Chrysophyllum cainito</i>	Rapini	<i>Brassica rapa cymosa</i>
Calabaza	<i>Cucurbita máxima</i>	Soya	<i>Glycine max</i>
Capulín	<i>Prunus serótina</i>	Tejocote	<i>Crataegus pubescens</i>
Cártamo, alazor	<i>Carthamus tinctorius</i>	Zapote blanco	<i>Casimiroa edulis</i>
Chabacano	<i>Prunus armeniaca</i>	Zapote negro	<i>Diospyros digyna</i>
Chile verde	<i>Capsicum frutescens</i>	No dependientes	
Chirimoya	<i>Annona cherimola</i>	Arroz	<i>Oryza sativa</i>
Ciruela almendra	<i>Prunus domestica</i>	Centeno	<i>Secale cereale</i>
Coco	<i>Cocos nucifera</i>	Jojoba	<i>Simmondsia chinensis</i>
Comino	<i>Cuminum cyminum</i>	Lenteja	<i>Lens culinaris</i>
Girasol	<i>Helianthus annuus</i>	Nuez de castilla	<i>Juglans regia</i>
Granada roja	<i>Punica granatum</i>	Uva	<i>Vitis vinífera</i>
Haba	<i>Vicia faba</i>	Dependencia desconocida	
Hierbabuena	<i>Mentha spicata</i>	Orégano	<i>Origanum vulgare</i>
Higo	<i>Ficus carica</i>	Perón	<i>Pyrus malus</i>
Lima	<i>Citrus x aurantifolia</i>	Tomillo	<i>Thymus vulgaris</i>

Tabla 6. Producción presente y futura de cultivos dependientes y no dependientes de polinizadores cuyo producto consumido depende **(a)** directa o **(b)** indirectamente de la polinización. Valores relativos en México para el 2010 (SIACON) y para el 2050 (según tendencia observada de 1980-2010 y según tasa de cambio debida a escenario de cambio climático). Los valores de producción están calculados según precio medio rural para el 2010 (SIACON).

a

Dependencia directa	Plantas dependientes	Plantas no dependientes	Total¹
Superficie total cosechada (ha) 10⁶	35 especies	9 especies	47 especies
2010	3.6	8.3	11.9
2050 (según tendencia 1980-2010)	4.7	8.7	13.3
2050 (según tasa de cambio climático)	3.7	6.7	10.4
Tasa de cambio promedio (%)	-13.5	-26.9	-16.2
Valor total de producción (MEX\$) 10⁹			
2010	86.0	80.5	166.5
2050 (según tendencia 1980-2010)	138.8	81.4	220.3
2050 (según tasa de cambio climático)	117.7	63.7	181.4
Impacto económico total por cambio climático al 2050 (MEX\$) 10 ⁹	-21.1	-17.7	-38.8
Impacto económico promedio por cambio climático al 2050 (MEX\$) 10 ⁹	-0.6	-2.0	-0.8

b

Dependencia indirecta	Plantas dependientes	Plantas no dependientes	Total¹
Superficie total cosechada (ha) 10⁶	8 especies	11 especies	27 especies
2010	0.13	0.8	0.9
2050 (según tendencia 1980-2010)	0.20	1.1	1.3
2050 (según tasa de cambio climático)	0.15	0.5	0.6
Tasa de cambio promedio (%)	-29.0	-41.5	-31.6
Valor total de producción (MEX\$) 10⁹			
2010	20.5	36.7	56.1
2050 (según tendencia 1980-2010)	26.2	52.7	79.5
2050 (según tasa de cambio climático)	18.8	24.4	43.7
Impacto económico total por cambio climático al 2050 (MEX\$) 10 ⁹	-7.4	-28.3	-35.9
Impacto económico promedio por cambio climático al 2050 (MEX\$) 10 ⁹	-0.9	-2.6	-1.3

¹ Se consideran plantas dependientes, no dependientes de polinizadores y plantas sin información sobre dependencia de polinizadores pero con información sobre producción presente y futura estimada.

Por otro lado, en los alimentos que dependen indirectamente de la polinización, se espera en promedio, una reducción mayor en el área cosechada de cultivos no dependientes que en los cultivos dependientes de polinizadores (42% vs. 29%). Asimismo, se esperan 3.8 más pérdidas económicas en los cultivos no dependientes que en los dependientes de polinizadores (Tabla 6b). En promedio, se esperan 2.9 veces más pérdidas económicas en plantas no dependientes que en las dependientes de polinizadores (Tabla 6b).

En promedio, se espera una disminución del 16% en la superficie total cosechada de alimentos que dependen directamente de la polinización, mientras que en los alimentos que dependen indirectamente de la polinización se espera un decremento del 32%. Aunado a esto, asumiendo que el precio medio rural del 2010 se mantiene constante en el 2050, se esperarían pérdidas económicas de 39 mil millones de pesos anuales en cultivos de frutos y semillas y pérdidas de 36 mil millones de pesos anuales en cultivos que producen partes vegetativas para consumo (Tablas 6a y 6b).

De las 74 especies de cultivos que se espera se sigan cosechando para el 2050, se espera una disminución en el valor total de producción de 52 cultivos, con una pérdida promedio de 44 millones de pesos anuales por cultivo. Por otro lado, en 22 cultivos se espera en promedio, un aumento de 30 millones de pesos anuales por cultivo. Considerando los 20 cultivos más importantes económicamente para el 2050, se espera una disminución en el valor total de producción en 12 cultivos, con una pérdida promedio de 6, 402 millones de pesos anuales por cultivo (Figura 23). En ocho de los cultivos más importantes se espera un aumento en promedio, de 1,934 millones de pesos anuales por cultivo en el valor total de producción.

Es importante enfatizar que los escenarios anteriormente expuestos, solamente consideran esencialmente dos factores ambientales (temperatura y precipitación) para predecir los rangos de distribución probables futuros para cultivos y polinizadores. Sin embargo, la respuesta de las especies a un cambio climático es muy compleja, pues diversos factores intervienen en la presencia o ausencia de las especies. A continuación señalamos algunos factores que pueden influir en la vulnerabilidad de los cultivos y polinizadores al cambio climático.

Sistema de apareamiento y nivel de dependencia de polinizadores. Las plantas predominantemente exocruzadas (ej. dioicas, monoicas, hermafroditas autoincompatibles)

que dependen de polinizadores en declive, han experimentado disminuciones más marcadas que especies menos dependientes de polinizadores [35].

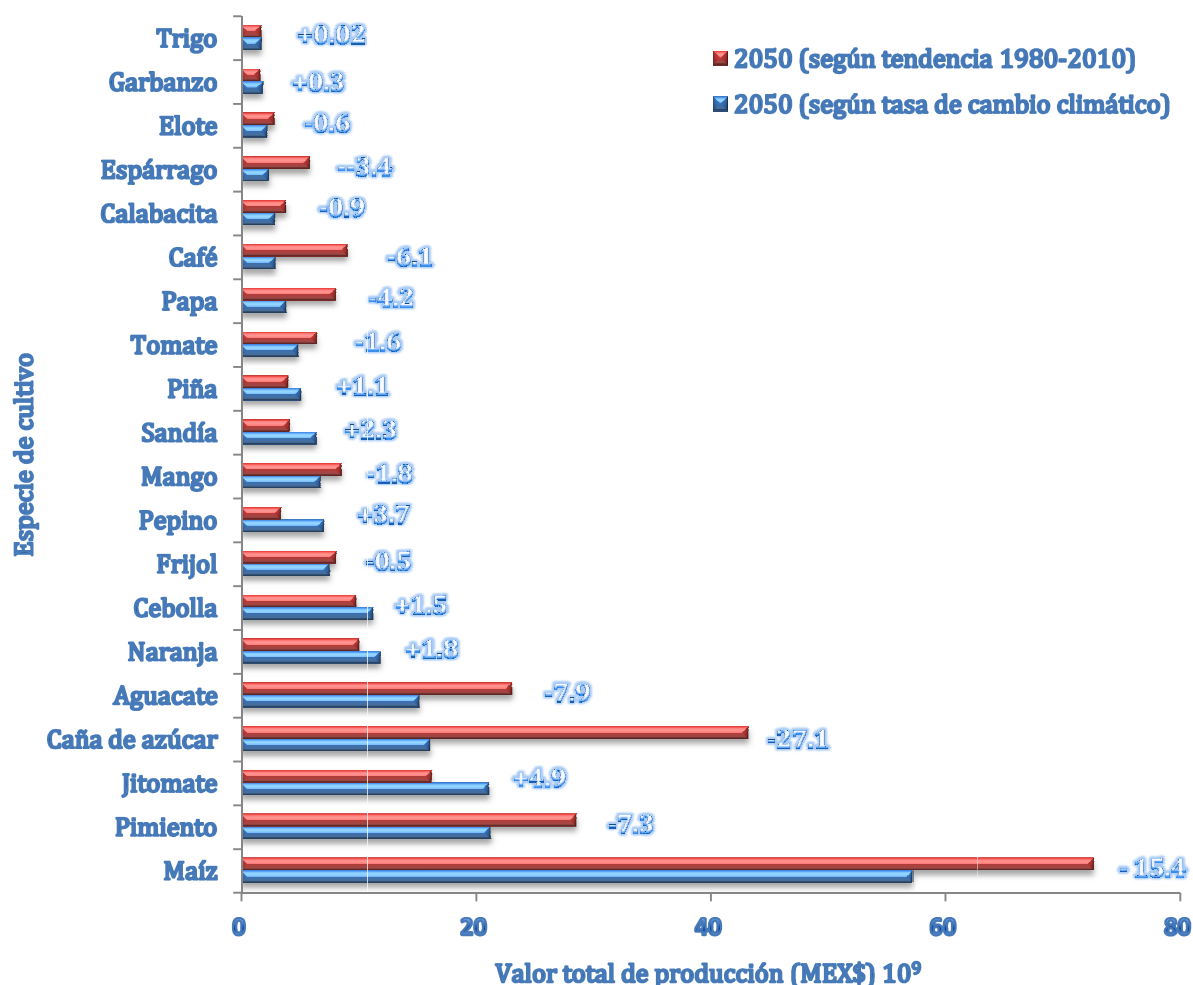


Figura 23. Valor total de producción en los 20 cultivos más importantes esperados para el 2050. Los números del lado derecho de las barras indican el cambio de valor total de producción en miles de millones de pesos para el 2050. Números negativos indican pérdidas y números positivos indican ganancias en el 2050 con relación al valor total producido en el 2010.

Nivel de especialización. Se ha documentado que los polinizadores que dependen de pocas especies de plantas son los que más han disminuido en número debido a perturbaciones antropogénicas, mientras que los generalistas han prosperado [35, 113]. Por lo tanto, se

espera que la especialización en los sistemas de polinización aumente el nivel de vulnerabilidad de las especies al cambio climático

Nivel de domesticación. Plantas con mayor historia de domesticación deberían presentar menores niveles de variación genética debido a la intensa selección artificial antropogénica. Por tanto, se espera que dichas especies presenten menor adaptabilidad y capacidad de respuesta al cambio climático que sus parientes silvestres.

4. Medidas para mitigar el impacto del cambio climático

El Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012, indica que México ocupa el 13º lugar a nivel mundial por sus emisiones de gases de efecto invernadero. El Inventario Nacional identifica que los principales sectores que emiten dichos gases son energía y transporte (61%), desechos (14%), cambio de uso de suelo y silvicultura (10%), procesos industriales (9%) y agricultura (6%)[114]. Es importante hacer notar que la producción agrícola, en sí, es generadora de emisiones de gases de efecto invernadero (EGEH). En 2005, se estimó que las EGEH relacionadas con la agricultura alcanzaron 10-12% del total de las EGEH antropogénicas[115]; mientras que el cambio de uso de suelo para uso agrícola, acumuló un 10% adicional de dichas emisiones a nivel mundial [116]. Los principales componentes de estas emisiones provienen directamente de la liberación de óxido nitroso (N_2O) por uso de fertilizantes, metano (CH_4) proveniente del estiércol del ganado, y ambos gases por la quema de residuos agrícolas y de bosques para conversión a uso agrícola e indirectamente por la producción de pesticidas, producción y operación de maquinaria agrícola y por la energía utilizada en las granjas o ranchos agrícolas [117]. Aunado a esto, las expansiones agrícolas a menudo ocurren en bosques tropicales, los cuales son más ricos en carbono que muchos de los bosques anteriormente deforestados [118].

Recientemente, México se sumó junto al Reino Unido como los dos únicos países que han aprobado legislaciones para aminorar los efectos del cambio climático. En la Ley General de Cambio Climático, México se compromete a reducir en el 2020 las emisiones de dióxido de carbono al 30% de los niveles alcanzados en el 2000, hasta alcanzar una reducción del 50% para el 2050. Asimismo, establece que el 35% de la electricidad deberá provenir de fuentes renovables para el 2024; así como la eliminación gradual de los subsidios a combustibles

fósiles, la creación de un fondo para el cambio climático y la conformación del Instituto Nacional de Ecología y Cambio climático.

Asimismo, se requieren diversas medidas adicionales para mitigar el impacto del cambio climático en los cultivos y en sus polinizadores, ya que el bienestar humano depende de la cantidad y estabilidad de la producción agrícola. En particular, ante la crisis inminente de polinizadores [35, 37, 83] y al aumento en el número de cultivos dependientes de polinizadores a través del tiempo, principalmente en países subdesarrollados [6], muchos cultivos dependientes disminuirán en gran medida su producción. Esto constituiría una de las mayores amenazas para la supervivencia de la especie humana, principalmente de comunidades rurales y personas de bajos ingresos, ya que ellos a menudo dependen directa y exclusivamente del servicio prestado por los polinizadores silvestres [3]. Incluso, se estima que de 1.4 a 6.7 millones de mexicanos emigrarán a Estados Unidos como resultado de la disminución en la producción agrícola para el 2080 [119].

Con el declive de los polinizadores también se espera que aumente la demanda de suelo agrícola para compensar los déficits provocados por su ausencia [6, 120], lo cual contribuiría a una mayor tasa de deforestación, lo que promovería aun más el cambio climático. Por lo tanto, un programa de conservación de polinizadores es una prioridad nacional para asegurar los servicios gratuitos de polinización para el suministro y mantenimiento de alimentos para la población [3].

A continuación, se enuncian diversas evidencias que dan pie a las medidas que deben implementarse para la conservación de los polinizadores, así como medidas para disminuir en lo posible los efectos del cambio climático en los cultivos y sus polinizadores.

- *Conservación.* La fragmentación y la pérdida de hábitat son unos de los principales causantes del declive en los polinizadores [27], ya que disminuye drásticamente la disponibilidad de alimentos y refugios. Por lo tanto, se requiere minimizar la pérdida de hábitat (incluyendo cuevas de murciélagos) por medio de programas de conservación de áreas ricas en especies de polinizadores, así como de los hábitats aledaños a los cultivos para mantener las poblaciones de polinizadores silvestres. Una manera de lograr esto es por medio del pago por servicios ambientales a ejidatarios que conserven dichas áreas. También se sugiere que se debe priorizar la conservación de las áreas sujetas al menor daño por cambio climático, así como

agrandar las áreas protegidas existentes hacia mayores altitudes o latitudes, lo cual incrementará la posibilidad de que contengan “refugios climáticos” en el futuro [121, 122].

- *Conectividad con hábitats naturales.* La tasa de visitas y riqueza de polinizadores silvestres de 16 cultivos en cinco continentes disminuye exponencialmente con la distancia a los hábitats naturales [123]. Por lo tanto, se recomienda generar agroecosistemas con mayor conectividad a hábitats naturales para mantener la comunidad de polinizadores silvestres y manejados [48]. Conociendo la especie de abeja polinizadora del cultivo de interés, se puede predecir la distancia de forrajeo de la abeja basado en el tamaño de ésta [124] y así, poder determinar la distancia mínima requerida entre el cultivo y su hábitat natural. Cuando el hábitat natural esté perturbado se requerirá de un manejo activo para la restauración; por ejemplo, por medio de la reforestación con especies nativas.
- *Sitios de anidación.* Favorecer las necesidades particulares de anidamiento de los polinizadores respectivos al cultivo, ya sea creando espacios libres de vegetación para abejas que anidan en el suelo [125] o dejando madera muerta para abejas que anidan en cavidades de la madera [126].
- *Cultivos heterogéneos.* La pérdida de diversidad de polinizadores puede tener efectos negativos tanto en sistemas naturales como agrícolas. Una comunidad heterogénea de especies de plantas nativas, una mayor diversidad de cultivos por unidad de área o la rotación de cultivos, puede ayudar a mitigar el declive de especies manejadas, además de mejorar el suelo, controlar la erosión y maximizar el control de plagas [1].
- *Cultivos resistentes.* Utilizar variedades o especies de cultivos con umbrales térmicos apropiados al lugar o con mayor resistencia a choques de calor o sequías; así como cambiar la tasa de uso de fertilizantes y de agua para mantener la calidad/cantidad del producto a consumir [127]. Por otro lado, se puede alterar el tiempo de plantación para evitar sequías o calor excesivo y evitar los meses previstos más secos y calientes (verano). Por ejemplo, estas alteraciones provocaron cambios favorables en la cosecha de sorgo en Italia [128].
- *Polinizadores nativos.* La cantidad de colonias de abejas de la miel se han visto grandemente disminuidas en gran medida debido principalmente al uso de pesticidas, parásitos, enfermedades e invasiones de abejas africanizadas [37]. Aunado a esto, se ha encontrado que la abeja de la miel no es el polinizador más

eficiente de muchas especies de cultivos [129, 130], e incluso que puede competir con los polinizadores nativos por los recursos florales o por sitios de anidamiento, ser polinizador de especies exóticas consideradas plaga o favorecer la introducción de patógenos a especies de abejas nativas [30]. Por lo tanto, se debe fomentar la utilización a escala nacional de especies de polinizadores nativos. Por ejemplo, se han utilizado con éxito, abejas sin aguijón como polinizadores de jitomate en México [109] y Brasil [131]; así como abejas nativas para la polinización efectiva de la nuez de la India en Brasil [129].

- *Áreas clave.* Se considera que hay mayores ganancias en cosecha en lugares bajo escenarios de aumento que en disminución de lluvias [132], ya que es más fácil manejar recursos abundantes que escasos.
- *Plaguicidas.* Una de las principales amenazas a los polinizadores y plantas nativas de las que se alimentan son el uso de insecticidas y herbicidas, respectivamente; principalmente aquellos de amplio espectro con fórmulas sistémicas o micro-encapsulados que pueden contaminar el néctar y polen [32, 133, 134]. Por tanto, se debe fomentar un buen manejo de la tierra, evitando el uso de plaguicidas y herbicidas [3]; así como fomentar un eficiente manejo de nutrimentos y agua, incorporación de residuos de cosechas y disminuir la labranza intensiva, lo cual incrementa la producción y ayuda a alcanzar una agricultura sustentable [135, 136].
- *Intensificación.* La intensificación en la agricultura produce menor cantidad de EGEH que la expansión en agricultura [137]. Por tanto, se debe fomentar el mejoramiento en las cosechas a través de avances tecnológicos en vez de expandir las tierras agrícolas. Dicha tecnología debe funcionar, de preferencia, con energías renovables. No obstante, el uso de tecnología incrementará el costo de la producción, así que serán necesarios análisis de costo-beneficio.
- *Investigación.* Solamente se conoce el nivel de dependencia de aproximadamente el 37% de las EPCA en México. De igual manera, se conocen las especies de polinizadores de solamente el 20% de las especies aprovechadas. Por tanto, se requiere de apoyo para investigación sobre los sistemas de polinización y el grado de dependencia de polinizadores de dichas especies. Asimismo, se deben apoyar investigaciones sobre las principales causas de disminución en especies particulares de cultivos y sus polinizadores; así como sobre la tolerancia térmica y el efecto de la elevación de la temperatura en componentes vegetativos y reproductivos de los

cultivos. Además, para poder juzgar adecuadamente el valor de los polinizadores silvestres de cada cultivo, se requiere la identificación de los polinizadores claves en las áreas de producción, sus requerimientos de hábitat y su impacto económico en la producción del cultivo [1]. También es necesario focalizar estudios sobre los requerimientos nutricionales y de hábitat de una mayor cantidad de polinizadores nativos para lograr reproducirlos y manejarlos y así, poder utilizarlos como una alternativa a las colonias de abejas melíferas.

- *Fondos.* Crear un fondo especialmente para la prevención de desastres en cultivos y áreas naturales relacionados con el cambio climático, incluyendo sequías, inundaciones, choques de calor e incendios; ya que se espera que la incertidumbre del clima sea mayor y la frecuencia de dichos fenómenos sean más frecuentes en el futuro, lo cual provocaría grandes pérdidas en la producción agrícola y en la abundancia de polinizadores. Por ejemplo, el fenómeno del Niño con sus ciclos asociados de sequía e inundaciones, explica entre el 15 y el 35% de la variación global en las cosechas de trigo y oleaginosas [138].

5. Literatura citada

- 1 Klein, A.M., *et al.* (2007) Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 274, 303–313
- 2 Williams, I. (1994) The dependence of crop production within the European Union on pollination by honey bees. *Agricultural Zoology Reviews* 6, 229–257
- 3 Ashworth, L., *et al.* (2009) Pollinator-dependent food production in Mexico. *Biol. Conserv.* 142, 1050–1057
- 4 Chacoff, N.P., *et al.* (2010) Pollinator dependence of Argentinean agriculture: Current status and temporal analysis. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology* 3, 106–116
- 5 Gallai, N., *et al.* (2009) Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecol. Econ.* 68, 810–821
- 6 Aizen, M.A., *et al.* (2009) How much does agriculture depend on pollinators? Lessons from long-term trends in crop production. *Ann. Bot.* 103, 1579–1588
- 7 Millennium Ecosystem Assessment (2005) *Ecosystems and human well-being: our human planet: summary for decision-makers*. Island Pr
- 8 WHO, J. (1990) Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases. *WHO Tech. Rep. Ser.* 916
- 9 Aizen, M.A., *et al.* (2008) Long-term global trends in crop yield and production reveal no current pollination shortage but increasing pollinator dependency. *Curr. Biol.* 18, 1572–1575
- 10 Aizen, M.A. and Harder, L.D. (2009) The global stock of domesticated honey bees is growing slower than agricultural demand for pollination. *Curr. Biol.* 19, 915–918
- 11 FAO, F.a.A.O.o.t.U.N. (2008) *Global action on pollination services for sustainable agriculture*. FAO
- 12 Ashman, T.L., *et al.* (2004) Pollen limitation of plant reproduction: ecological and evolutionary causes and consequences. *Ecology* 85, 2408–2421
- 13 Knight, T.M., *et al.* (2005) Pollen limitation of plant reproduction: pattern and process. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 36, 467–497
- 14 Burd, M. (1994) Bateman's principle and plant reproduction: the role of pollen limitation in fruit and seed set. *The Botanical Review* 60, 83–139
- 15 Kearns, C.A., *et al.* (1998) Endangered mutualisms: the conservation of plant-pollinator interactions. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 29, 83–112
- 16 Ghazoul, J. (2005) Buzziness as usual? Questioning the global pollination crisis. *Trends Ecol. Evol.* 20, 367–373
- 17 Blanche, R. and Cunningham, S.A. (2005) Rain forest provides pollinating beetles for atemoya crops. *J. Econ. Entomol.* 98, 1193–1201
- 18 Calzoni, G.L. and Speranza, A. (1998) Insect controlled pollination in Japanese plum (*Prunus salicina* Lindl.). *Scientia Horticulturae* 72, 227–237
- 19 Klein, A.M., *et al.* (2003) Fruit set of highland coffee increases with the diversity of pollinating bees. *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 270, 955–961
- 20 Morandin, L.A. and Winston, M.L. (2005) Wild bee abundance and seed production in conventional, organic, and genetically modified canola. *Ecol. Appl.* 15, 871–881
- 21 Olschewski, R., *et al.* (2006) Economic evaluation of pollination services comparing coffee landscapes in Ecuador and Indonesia. *Ecol. Soc.* 11, 7
- 22 Sala, O.E., *et al.* (2000) Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287, 1770–1774
- 23 Saunders, D.A., *et al.* (1991) Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. *Conserv. Biol.* 5, 18–32
- 24 Harvey, C.A. and Villalobos, J.A.G. (2007) Agroforestry systems conserve species-rich but modified assemblages of tropical birds and bats. *Biodivers. Conserv.* 16, 2257–2292

- 25 Kremen, C., *et al.* (2002) Crop pollination from native bees at risk from agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99, 16812–16816
- 26 Perfecto, I., *et al.* (2003) Conservation of biodiversity in coffee agroecosystems: a tri-taxa comparison in southern Mexico. *Biodivers. Conserv.* 12, 1239–1252
- 27 Winfree, R., *et al.* (2009) A meta-analysis of bees' responses to anthropogenic disturbance. *Ecology* 90, 2068–2076
- 28 Chacoff, N.P. and Aizen, M.A. (2006) Edge effects on flower-visiting insects in grapefruit plantations bordering premontane subtropical forest. *J. Appl. Ecol.* 43, 18–27
- 29 Ricketts, T.H., *et al.* (2008) Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns? *Ecol. Lett.* 11, 499–515
- 30 Goulson, D. (2003) Effects of introduced bees on native ecosystems. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 34, 1–26
- 31 Morales, C.L. and Aizen, M.A. (2002) Does invasion of exotic plants promote invasion of exotic flower visitors? A case study from the temperate forests of the southern Andes. *Biol. Invasions* 4, 87–100
- 32 Kevan, P.G. (1975) Forest application of the insecticide Fenitrothion and its effect on wild bee pollinators (Hymenoptera: Apoidea) of lowbush blueberries (*Vaccinium* spp.) in Southern New Brunswick, Canada. *Biol. Conserv.* 7, 301–309
- 33 Kevan, P.G., *et al.* (1997) Log-normality of biodiversity and abundance in diagnosis and measuring of ecosystemic health: pesticide stress on pollinators on blueberry heaths. *J. Appl. Ecol.* 34, 1122–1136
- 34 Parra-Tabla, V., *et al.* (1998) Efecto del uso de pesticidas en la riqueza y abundancia de abejas nativas asociadas a cultivos hortícolas en el estado de Yucatán, México. pp. 203–206
- 35 Biesmeijer, J.C., *et al.* (2006) Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science* 313, 351–354
- 36 Maes, D. and Van Dyck, H. (2001) Butterfly diversity loss in Flanders (north Belgium): Europe's worst case scenario? *Biol. Conserv.* 99, 263–276
- 37 Potts, S.G., *et al.* (2010) Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends Ecol. Evol.* 25, 345–353
- 38 Schweiger, O., *et al.* (2010) Multiple stressors on biotic interactions: how climate change and alien species interact to affect pollination. *Biological Reviews* 85, 777–795
- 39 Aguilar, R., *et al.* (2006) Plant reproductive susceptibility to habitat fragmentation: review and synthesis through a meta-analysis. *Ecol. Lett.* 9, 968–980
- 40 Aizen, M.A. and Feinsinger, P. (1994) Forest fragmentation, pollination, and plant reproduction in a Chaco dry forest, Argentina. *Ecology* 75, 330–351
- 41 Quesada, M., *et al.* (2011) Human impacts on pollination, reproduction and breeding systems in tropical forest plants. In *Seasonal dry tropical forests* (Dirzo, R., *et al.*, eds), Island Press
- 42 Quesada, M., *et al.* (2004) Effects of forest fragmentation on pollinator activity and consequences for plant reproductive success and mating patterns in bat-pollinated bombacaceous trees. *Biotropica* 36, 131–138
- 43 Aguilar, R., *et al.* (2008) Genetic consequences of habitat fragmentation in plant populations: susceptible signals in plant traits and methodological approaches. *Mol. Ecol.* 17, 5177–5188
- 44 Becker, P., *et al.* (1991) More about euglossine bees in Amazonian forest fragments. *Biotropica*, 586–591
- 45 Brosi, B.J., *et al.* (2008) The effects of forest fragmentation on bee communities in tropical countryside. *J. Appl. Ecol.* 45, 773–783

- 46 Cane, J.H., *et al.* (2006) Complex responses within a desert bee guild (Hymenoptera: Apiformes) to urban habitat fragmentation. *Ecol. Appl.* 16, 632–644
- 47 Donaldson, J., *et al.* (2002) Effects of habitat fragmentation on pollinator diversity and plant reproductive success in renosterveld shrublands of South Africa. *Conserv. Biol.* 16, 1267–1276
- 48 Steffan-Dewenter, I., *et al.* (2006) Bee diversity and plant–pollinator interactions in fragmented landscapes. *Specialization and generalization in plant–pollinator interactions* (ed. NM Waser & J. Ollerton), 387–408
- 49 Carré, G., *et al.* (2009) Landscape context and habitat type as drivers of bee diversity in European annual crops. *Agric., Ecosyst. Environ.* 133, 40–47
- 50 Bates, A.J., *et al.* (2011) Changing bee and hoverfly pollinator assemblages along an urban-rural gradient. *Plos One* 6, 1–11
- 51 Westphal, C., *et al.* (2003) Mass flowering crops enhance pollinator densities at a landscape scale. *Ecol. Lett.* 6, 961–965
- 52 Alston, D.G., *et al.* (2007) Effects of the insecticide phosmet on solitary bee foraging and nesting in orchards of Capitol Reef National Park, Utah. *Environ. Entomol.* 36, 811–816
- 53 Brittain, C., *et al.* (2010) Impacts of a pesticide on pollinator species richness at different spatial scales. *Basic Appl. Ecol.* 11, 106–115
- 54 Gabriel, D. and Tschardt, T. (2007) Insect pollinated plants benefit from organic farming. *Agric., Ecosyst. Environ.* 118, 43–48
- 55 Garibaldi, L.A., *et al.* (2011) Stability of pollination services decreases with isolation from natural areas despite honey bee visits. *Ecol. Lett.* 14, 1062–1072
- 56 Stout, J.C. and Morales, C.L. (2009) Ecological impacts of invasive alien species on bees. *Apidologie* 40, 388–409
- 57 Lambdon, P.W., *et al.* (2008) Alien flora of Europe: species diversity, temporal trends, geographical patterns and research needs. *Preslia* 80, 101–149
- 58 Kleijn, D. and Raemakers, I. (2008) A retrospective analysis of pollen host plant use by stable and declining bumble bee species. *Ecology* 89, 1811–1823
- 59 Lopezaraiza-Mikel, M.E., *et al.* (2007) The impact of an alien plant on a native plant-pollinator network: an experimental approach. *Ecol. Lett.* 10, 539–550
- 60 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007) *Climate change 2007: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC
- 61 Deutsch, C.A., *et al.* (2008) Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, 6668–6672
- 62 Hegland, S.J., *et al.* (2009) How does climate warming affect plant-pollinator interactions? *Ecol. Lett.* 12, 184–195
- 63 Lenoir, J., *et al.* (2008) A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science* 320, 1768–1771
- 64 Konvicka, M., *et al.* (2003) Uphill shifts in distribution of butterflies in the Czech Republic: effects of changing climate detected on a regional scale. *Global Ecol. Biogeogr.* 12, 403–410
- 65 Parmesan, C., *et al.* (1999) Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature* 399, 579–583
- 66 Thomas, C.D. and Lennon, J.J. (1999) Birds extend their ranges northwards. *Nature* 399, 213
- 67 Brommer, J.E. (2004) The range margins of northern birds shift polewards. pp. 391–397, Helsinki: Suomen Biologian Seura Vanamo
- 68 Zuckerberg, B., *et al.* (2009) Poleward shifts in breeding bird distributions in New York State. *Global Change Biol.* 15, 1866–1883

- 69 Memmott, J., *et al.* (2007) Global warming and the disruption of plant–pollinator interactions. *Ecol. Lett.* 10, 710–717
- 70 Bartomeus, I., *et al.* (2011) Climate-associated phenological advances in bee pollinators and bee-pollinated plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, 20645–20649
- 71 Miller-Rushing, A.J. and Primack, R.B. (2008) Global warming and flowering times in Thoreau's concord: A community perspective. *Ecology* 89, 332–341
- 72 Kudo, G., *et al.* (2004) Does seed production of spring ephemerals decrease when spring comes early? *Ecol. Res.* 19, 255–259
- 73 Wolkovich, E., *et al.* (2012) Warming experiments underpredict plant phenological responses to climate change. *Nature*, in press
- 74 Boote, K.J., *et al.* (2005) Elevated temperature and CO₂ impacts on pollination, reproductive growth, and yield of several globally important crops. *Journal of Agricultural Meteorology* 60, 469–474
- 75 Ratnieks, F. and Visscher, P. (1996) Living with the Africanized bee: Sinaloa beekeepers adapt pollination to Africanized bees. *Calif. Agric.* 50, 24–28
- 76 Carreck, N. and Williams, I. (1998) The economic value of bees in the UK. *Bee World* 79, 115–123
- 77 Breeze, T.D., *et al.* (2011) Pollination services in the UK: How important are honeybees? *Agriculture Ecosystems & Environment* 142, 137–143
- 78 Kraus, B. and PAGE, R.E. (1995) Effect of *Varroa jacobsoni* (Mesostigmata: Varroidae) on feral *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) in California. *Environ. Entomol.* 24, 1473–1480
- 79 Sammartaro, D., *et al.* (2000) Parasitic mites of honey bees: life history, implications, and impact. *Annu. Rev. Entomol.* 45, 519–548
- 80 Hayes, J. (2010) Global honey bee decline and its effects on agricultural production. *American Bee Journal* 150, 853–855
- 81 Neumann, P. and Carreck, N.L. (2010) Honey bee colony losses. *J. Apic. Res.* 49, 1–6
- 82 Xie, Z.H. (2011) Managed honeybee colonies and honey production in China grew during the last five decades. *Journal of Apicultural Science* 55, 77–85
- 83 Steffan-Dewenter, I., *et al.* (2005) Pollinator diversity and crop pollination services are at risk. *Trends in Ecology and Evolution* 20, 651–651
- 84 Kerr, W.E. (1967) The history of the introduction of African bees to Brazil. *Apic. W. Aust.* 2, 53–55
- 85 Guzman-Novoa, E., *et al.* (2011) Colonization, impact and control of Africanized honey bees in Mexico. *Vet. Mex.* 42, 149–178
- 86 Quezada-Euán, J.J.G. (2007) A retrospective history of the expansion of Africanized honeybees in Mexico. *J. Apic. Res.* 46, 295
- 87 Guzman-Novoa, E. and Page, R.E. (1994) The impact of Africanized bees on Mexican beekeeping. *American Bee Journal* 134, 101–106
- 88 Page, R.E. and Guzmán-Novoa, E. (1997) The genetic basis of disease resistance. In *Honey bee pests, predators and diseases*. (Morse, R.A. and Flottum, K., eds), pp. 469–492, Root Co.
- 89 Loper, G.M. and Danka, R.G. (1991) Pollination tests with Africanized honey bees in southern Mexico. *American Bee Journal* 131, 191–193
- 90 Roubik, D.W. and Villanueva-Gutierrez, R. (2009) Invasive Africanized honey bee impact on native solitary bees: a pollen resource and trap nest analysis. *Biol. J. Linn. Soc.* 98, 152–160
- 91 Velthuis, H.H.W. and van Doorn, A. (2006) A century of advances in bumblebee domestication and the economic and environmental aspects of its commercialization for pollination. *Apidologie* 37, 421–451

- 92 Vergara, C. (2008) Environmental impact of exotic bees introduced for crop pollination. In *Bee pollination in agricultural ecosystems* (James, R. and Pitts-Singer, T.L., eds), pp. 145–166, Oxford University Press
- 93 Cuadriello, I. (2011) Ephippol, Mexican bumble bees for greenhouse pollinators. In *X International Symposium of Pollination*
- 94 Heard, T.A. (1999) The role of stingless bees in crop pollination. *Annu. Rev. Entomol.* 44, 183–206
- 95 Quezada-Euán, J.J.G. (2005) *Biología y uso de las abejas sin aguijón de la península de Yucatán, México (Hymenoptera, Meliponini)*. Universidad Autónoma de Yucatán
- 96 Díaz, S., et al. (2006) Biodiversity loss threatens human well-being. *PLoS Biol.* 4, e277
- 97 Partap, U., et al. (2001) Pollination failure in apple crop and farmers' management strategies in Hengduan Mountains, China. *Proceedings of the Eight International Pollination Symposium Pollination: Integrator of Crops and Native Plant Systems*, 225–230
- 98 INEGI (2010) Censo Nacional de Población y Vivienda (2010) del INEGI. Censos y Conteos.
- 99 Torres, F. (2001) El saldo del siglo XX: la inseguridad alimentaria en México. *XXI seminario de economía agrícola. Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM, Mexico*, 1–32
- 100 Harlan, J.L. (1975) Crops and man. In *Foundation for modern crop science series*, American Society for Agronomy
- 101 Bye, R., et al. (2000) Relationships between Mexican ethnobotanical diversity and indigenous peoples. *Biodiversity and Native America*, 44–73
- 102 Smith, N., et al. (1992) *Tropical forest and their crops*. Cornell University Press, USA
- 103 Maxted, N., et al. (2007) Creation and use of a national inventory of crop wild relatives. *Biol. Conserv.* 140, 142–159
- 104 Roubik, D.W. (1995) *Pollination of cultivated plants in the tropics*. Food & Agriculture Org.
- 105 Garibaldi, L.A., et al. (2011) Services from plant–pollinator interactions in the Neotropics.
- 106 FAO, F.a.A.O.o.t.U.N. (2009) *Guidelines for the economic valuation of pollination services at a national scale*. FAO
- 107 Cruz, D.O., et al. (2005) Pollination efficiency of the stingless bee *Melipona subnitida* on greenhouse sweet pepper. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 40, 1197–1201
- 108 Santos, S.A.B., et al. (2008) Pollination of cucumber, *Cucumis sativus* L.(Cucurbitales: Cucurbitaceae), by the stingless bees *Scaptotrigona* aff. *depilis* Moure and *Nannotrigona testaceicornis* Lepeletier (Hymenoptera: Meliponini) in greenhouses. *Neotrop. Entomol.* 37, 506–512
- 109 Cauch, O., et al. (2004) Behavior and pollination efficiency of *Nannotrigona perilampoides* (Hymenoptera:Meliponini) on greenhouse tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) in subtropical Mexico. *J. Econ. Entomol.* 97, 475–481
- 110 Eilers, E.J., et al. (2011) Contribution of pollinator-mediated crops to nutrients in the human food supply. *Plos One* 6, e21363
- 111 Phillips, S.J., et al. (2007) Maxent software for species habitat modeling.
- 112 Hijmans, R.J., et al. (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology* 25, 1965–1978
- 113 Memmott, J., et al. (2004) Tolerance of pollination networks to species extinctions. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 271, 2605–2611
- 114 Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (2009) II. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. pp. 63, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología.

- 115 Smith, P. (2007) Agriculture. In *Climate change 2007: mitigation of climate change: contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Metz, B., et al., eds), Cambridge University Press
- 116 Canadell, J.G., et al. (2007) Contributions to accelerating atmospheric CO² growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104, 18866–18870
- 117 West, T.O. and Marland, G. (2002) A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture Ecosystems & Environment* 91, 217–232
- 118 Loarie, S.R., et al. (2009) Boosted carbon emissions from Amazon deforestation. *Geophys Res Lett* 36, L1410
- 119 Feng, S., et al. (2010) Linkages among climate change, crop yields and Mexico-US cross-border migration. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107, 14257–14262
- 120 Garibaldi, L.A., et al. (2011) Global growth and stability of agricultural yield decrease with pollinator dependence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108, 5909–5914
- 121 Lindenmayer, D.B., et al. (2010) Conservation strategies in response to rapid climate change: Australia as a case study. *Biol. Conserv.* 143, 1587–1593
- 122 Shoo, L.P., et al. (2011) Targeted protection and restoration to conserve tropical biodiversity in a warming world. *Global Change Biol.* 17, 186–193
- 123 Ricketts, T.H., et al. (2008) Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns? *Ecol. Lett.* 11, 499–515
- 124 Greenleaf, S.S., et al. (2007) Bee foraging ranges and their relationship to body size. *Oecologia* 153, 589–596
- 125 Cane, J.H. (1997) Ground-nesting bees: the neglected pollinator resource for agriculture. *Acta Horticulturae (Wageningen)* 437, 309–324
- 126 Westrich, P. (1996) Habitat requirements of central European bees and the problems of partial habitats. pp. 1–16, ACADEMIC PRESS LIMITED
- 127 Howden, S.M., et al. (2007) Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104, 19691–19696
- 128 Tubiello, F.N., et al. (2000) Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. *European Journal of Agronomy* 13, 179–189
- 129 Freitas, B.M. and Paxton, R.J. (1998) A comparison of two pollinators: the introduced honey bee *Apis mellifera* and an indigenous bee *Centris tarsata* on cashew *Anacardium occidentale* in its native range of NE Brazil. *J. Appl. Ecol.* 35, 109–121
- 130 Greenleaf, S.S. and Kremen, C. (2006) Wild bees enhance honey bees' pollination of hybrid sunflower. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103, 13890–13895
- 131 Del Sarto, M.C.L., et al. (2005) Evaluation of the neotropical stingless bee *Melipona quadrifasciata* (Hymenoptera : Apidae) as pollinator of greenhouse tomatoes. *J. Econ. Entomol.* 98, 260–266
- 132 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007) *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability.*
- 133 Wood, G.W. (1979) Recuperation of native bee (Hymenoptera, Andrenidae, Apidae, Halictidae) populations in blueberry fields exposed to drift of fenotrothion from forest spray operations in New Brunswick. *J. Econ. Entomol.* 72, 36–39
- 134 Delaplane, K.S. and Mayer, D.F. (2000) *Crop pollination by bees.* Cabi

- 135 Matson, P.A., *et al.* (1997) Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science* 277, 504–509
- 136 Tilman, D., *et al.* (2002) Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671–677
- 137 Burney, J.A., *et al.* (2010) Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 12052–12057
- 138 Ferris, J.N. (1999) *An analysis of the impact of ENSO (El Niño/Southern Oscillation) on global crop yields*. Department of Agricultural Economics, Michigan State University