



UN PROGRAMA PARA MÉXICO DE CONSERVACIÓN Y USO DE LA DIVERSIDAD GENÉTICA DE LAS PLANTAS DOMESTICADAS Y SUS PARIENTES SILVESTRES

A MEXICAN PROGRAM FOR THE CONSERVATION AND USE OF GENETIC DIVERSITY OF DOMESTICATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Alicia Mastretta-Yanes¹, Mauricio R. Bellon², Francisca Acevedo²,
Caroline Burgeff², Daniel Piñero^{2,3} y José Sarukhán^{2,3*}

¹CONACYT-Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Ciudad de México, México. ²CONABIO, Ciudad de México, México. ³Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

*Autor de correspondencia (sarukhan@unam.mx)

RESUMEN

México es un centro de origen de la agricultura y domesticación de plantas. Como resultado, más de 130 cultivos son originarios de México y forman parte de un profundo entramado biocultural que permite realizar agricultura en un amplio rango de condiciones ambientales. Esta agrobiodiversidad emergió del proceso de la evolución bajo domesticación, el cual ocurrió de forma similar por miles de años, hasta el inicio de la revolución verde. A pesar de que la agricultura intensiva promovida por la revolución verde incrementó considerablemente los rendimientos y proveyó seguridad alimentaria para algunas regiones, ha tenido también consecuencias negativas al medio ambiente y a la salud humana, y además, en el caso de México, no satisface todas las necesidades de las condiciones productivas de los campesinos, considerando la heterogeneidad ambiental. Por lo tanto, es necesario buscar técnicas de producción alternativas, efectivas para cada contexto ambiental, socio-cultural y económico. Se propone una iniciativa con dos objetivos principales: 1) estudiar, conocer y conservar la diversidad genética de los cultivos nativos de México y sus parientes silvestres, y preservar el proceso de la evolución bajo domesticación que genera y mantiene dicha diversidad; y 2) utilizar esta diversidad para fortalecer la producción de alimentos y fibras de forma socialmente justa minimizando los impactos ambientales. Para cumplir estos objetivos, la iniciativa se enfoca en la fuente de variación disponible para la domesticación (diversidad genética y genómica funcional), el contexto en el que la domesticación actúa (mejoramiento y producción) y uno de sus mayores retos (cambio ambiental). La investigación en estos componentes debe enfocarse en conectar los aspectos teóricos del proceso evolutivo con aspectos prácticos de la conservación y producción. Se resumen los objetivos, retos principales y preguntas de investigación claves para cada componente, seguidos de una ruta crítica para la consolidación de esta iniciativa nacional y avances efectuados por la CONABIO.

Palabras clave: Evolución bajo domesticación, recursos fitogenéticos, seguridad alimentaria, cambio ambiental.

SUMMARY

Mexico is a center of origin for agriculture and plant domestication. As a result, more than 130 crops are native to Mexico, forming part of a deep biocultural network and allowing agriculture to take place in a wide range of environmental conditions. This agrobiodiversity emerged from the process of evolution under domestication, which occurred similarly for thousands of years, until the onset of the green revolution. Although the intensive agriculture promoted by the green revolution significantly increased yields and provided food security for some regions, it has also had negative

consequences for the environment and human health, and it does not fulfill all smallholder's needs, especially considering the heterogenous environmental conditions in the case of Mexico. Therefore, it is necessary to look for alternative production techniques, effective for each environmental, socio-cultural, and economic context. An initiative with two main objectives is proposed: 1) to study, understand and conserve the genetic diversity of crops native to Mexico and their wild relatives, as well as to preserve the ongoing processes of evolution under domestication that generate and maintain this diversity; and 2) to use this diversity to strengthen food and fiber production in a socially fair manner while minimizing environmental impacts. To fulfill these objectives, the initiative focuses on the source of variation available for domestication (genetic diversity and functional genomics), the context in which domestication acts (breeding and production) and one of its main challenges (environmental change). Research on these components should focus on connecting the theoretical aspects of the evolutionary processes with practical aspects of conservation and production. The objectives, main challenges and key research questions for each component are summarized, followed by a critical pathway for consolidation of this national initiative and current progress made by CONABIO.

Index words: Evolution under domestication, plant genetic resources, food security, environmental change.

EVOLUCIÓN BAJO DOMESTICACIÓN: DEL ORIGEN DE LA AGRICULTURA A LOS RETOS MODERNOS

Hace alrededor de 10 mil años, diferentes culturas de América, Asia y África inventaron, de forma independiente entre sí, la agricultura (Diamond, 2012; Harlan, 1971); con ello dieron paso a asentamientos humanos sedentarios, estratificados y capaces de sostener poblaciones cada vez mayores, que se convirtieron en las primeras grandes civilizaciones (Diamond, 1997). Mesoamérica, que ocupa buena parte del territorio que ahora es México, fue uno de estos sitios; como resultado, nuestro país es centro mundial de domesticación y origen de plantas cultivadas tan importantes como el maíz (*Zea mays*), el frijol (*Phaseolus vulgaris*) y alrededor de 130 especies más (Acevedo *et al.*, 2009; Casas *et al.*, 2016; Harlan, 1971; Vavilov, 1951).

Estas especies no son sólo fuente de alimento, sino que forman parte de un profundo entramado biocultural que se refleja en la vasta gastronomía mexicana y en la posibilidad de cultivar a lo largo de las heterogéneas condiciones ambientales del país; sin embargo, aunque la agricultura lleva milenios practicándose en nuestro país y aporta algunos de los principales cultivos del mundo, hoy se enfrenta a un reto mayúsculo: ¿cómo alimentar con una dieta de calidad a una creciente población humana en un contexto de cambio climático, pérdida de biodiversidad, recursos naturales finitos, migraciones humanas y los efectos negativos de la agricultura industrializada? y más aún ¿cómo hacerlo sin perder el legado biocultural de los pueblos y sin degradar más los ecosistemas naturales remanentes de la Tierra? Para responder las preguntas anteriores, en este documento se plantea una iniciativa centrada en el proceso evolutivo gracias al cual la agricultura es posible: la domesticación.

La agricultura es una consecuencia de la evolución bajo domesticación, proceso que inició antes de la agricultura como tal, y que continúa vigente (Cuadro 1). Gracias a este proceso los seres humanos hemos creado diversidad biológica que no existiría de otra forma, y de la cual depende nuestra alimentación: la agrobiodiversidad. Quienes hoy cultivan utilizando sus propias semillas son las y los herederos del proceso de domesticación que iniciaron los pueblos indígenas miles de años atrás (Boege, 2008); esto implica, por un lado, que también son quienes tienen el conocimiento tradicional asociado al uso de dicha diversidad (Toledo *et al.*, 2001). Sin este conocimiento, la diversidad de los cultivos no es útil por sí misma, pues para serlo, los rasgos dados por la variación genética deben asociarse a prácticas de manejo dirigidas a sacarles provecho; por el otro, también implica que el proceso de domesticación literalmente está en sus manos: la práctica campesina de conservar parte de la cosecha para usarla como semilla en el siguiente ciclo agrícola, así como compartir parte de esas semillas con otros agricultores es la acción que permite que los alelos seleccionados artificial (basada en preferencias personales y culturales, así como en tipo de uso) o naturalmente (según las condiciones ambientales de la parcela) pasen a la siguiente generación, de manera que continúe el proceso evolutivo. Así, el proceso de domesticación transcurrió exclusivamente en manos de los y las agricultoras del mundo a través del cultivo, selección e intercambio de semillas, u otra forma de germoplasma desde sus orígenes, hace 10,000 años, hasta poco después de la Segunda Guerra Mundial en el siglo XX, cuando nació la agricultura intensiva (Harlan, 1975).

Con el surgimiento de la agricultura intensiva, el proceso

de domesticación comenzó a darse no sólo en manos de quienes siembran los cultivos, sino en centros de investigación con distintos mecanismos de selección artificial y enfocados en mejorar la producción. Este tipo de agricultura se introdujo a países en desarrollo durante la revolución verde (1960-1990). En dicho periodo, la seguridad alimentaria se trató como un problema de producción, que se resolvía a través del mejoramiento de cultivos elite, también llamadas líneas mejoradas o variedades modernas, bajo condiciones de altos insumos agrícolas (e.g. fertilizantes y pesticidas) y enfocando la selección en el rendimiento, la adaptación amplia en vez de local y la facilidad para cosechar mecánicamente (Baranski, 2015; Crow, 1998; Sonnenfeld, 1992). Como resultado, se obtuvieron incrementos dramáticos en el rendimiento de algunos cultivos, principalmente granos, lo que a su vez llevó a incrementos igualmente importantes en la producción de alimentos; por ejemplo, en sólo 40 años (1960-2000) la producción de granos se duplicó en relación con lo que había logrado producirse desde la invención de la agricultura (Khush, 2001); como consecuencia, el costo de los alimentos se redujo a nivel global y el abastecimiento incrementó de forma importante en países en desarrollo (Evenson y Gollin, 2003; Pingali, 2012).

Si bien la revolución verde marcó la diferencia en la producción mundial de alimentos a partir de 1960, la agricultura intensiva e insumos que ésta promovió (y que sigue promoviendo) también ha tenido importantes consecuencias y limitaciones a nivel ambiental, económico, de la salud humana y de la diversidad agrícola (Cuadro 2). Aunque algunas de estas consecuencias no son intencionales, o representan una externalidad negativa difícil de evitar, no pueden permanecer ignoradas. Para países como México, que aún mantiene importantes remanentes de sus ecosistemas naturales, una rica agrobiodiversidad nativa y culturas indígenas, esto es particularmente alarmante por tres motivos; primero, el futuro de lo que queda de ecosistemas naturales, y por ende la biodiversidad, dependerá de cómo y dónde se realice la producción forestal y de alimentos en las próximas décadas (Tschardtke *et al.*, 2012); segundo, el derecho a la alimentación sana y culturalmente apropiada (englobados en la soberanía alimentaria) de la población depende de que los pueblos, y las y los agricultores que les alimentan, puedan conservar y utilizar su agrobiodiversidad (Mulvany, 2017); y tercero, considerando la diversidad de ambientes y condiciones sociales donde la agricultura ocurre en México y otros países similares, es altamente improbable que un solo sistema agrícola pueda solucionar nuestros problemas de producción de alimentos y fibras (Kahane *et al.*, 2013).

Cuadro 1. El proceso de domesticación bajo evolución y el origen de la agrobiodiversidad.

La domesticación de especies es un proceso evolutivo en el que los seres humanos, a través de la selección artificial, consciente o inconsciente, aprovechan la variación presente en una especie silvestre para ajustar poblaciones de dicha especie a sus necesidades; por ejemplo, modificando sus características morfológicas o de comportamiento (Darwin, 1859). La domesticación de plantas ocurre en un gradiente, donde la forma más incipiente de manejo es el tolerar la presencia de ciertas especies por encima de otras, seguida por fomentar su reproducción o crecimiento, y así hasta llegar a las especies domesticadas cuya reproducción está completamente mediada por los seres humanos.

Análisis genéticos entre especies silvestres y sus contrapartes domesticadas (e.g. Baute *et al.*, 2015; Guerra-García *et al.*, 2017; Hufford *et al.*, 2012; Zhu *et al.*, 2007) muestran que, aunque la mayoría aún pueden cruzarse entre sí, el proceso de diferenciación comenzó entre 10 mil y 5 mil años para la mayoría de los grandes cultivos (Meyer *et al.*, 2012) y se ha mantenido a la fecha, de modo que se les puede considerar entidades evolutivas separadas. A nivel fenotípico, los efectos de la domesticación son aún más obvios, pues en comparación con sus ancestros silvestres, las formas domesticadas tienden a: tener frutos o semillas más grandes, perder su capacidad de dispersión de semillas, ser más robustas y mostrar dominancia apical, perder la latencia de las semillas, disminuir los sabores amargos, entre otros rasgos que colectivamente se agrupan en el llamado síndrome de domesticación, que se repite en especies domesticadas, así sean de familias botánicas distintas (Harlan, 1971; Harlan *et al.*, 1973; Meyer *et al.*, 2012).

La selección artificial sobre las poblaciones domesticadas ha sido tal, que incluso pueden llegar a convertirse en subespecies (como el caso del maíz *Zea mays* ssp. *mays*) o especies (como el trigo, *Triticum aestivum*) distintas de la especie silvestre ancestral. Estos cultivos están a su vez divididos en variedades, que se han diferenciado genéticamente dependiendo de las preferencias culturales y las condiciones ambientales de diferentes poblaciones humanas. Así, mediante el proceso de domesticación, los seres humanos han creado diversidad biológica que no existiría de otra forma: la agrobiodiversidad.

La agrobiodiversidad engloba a las especies de plantas y animales, cultivadas y domesticadas para la alimentación y otros usos, pero no se restringe sólo a éstas; por un lado, tras la domesticación, las especies silvestres ancestrales no sólo prevalecen en el medio silvestre, sino que además poseen una rica diversidad genética producto de no haber pasado por los cuellos de botella de la domesticación (pérdida de diversidad genética debido a fundar una población a partir de una muestra reducida de la población original). Dada su cercanía filogenética, dicha diversidad genética puede ser introducida de nuevo en los cultivos mediante técnicas de mejoramiento. Además, otras especies silvestres cercanas también albergan una importante diversidad genética.

En conjunto, estas especies constituyen a los parientes silvestres de los cultivos (Maxted *et al.*, 2006; 2014). Así, a nivel genético la agrobiodiversidad incluye no sólo diversidad genética dentro de los cultivos, sino también a sus parientes silvestres. Por otro lado, las parcelas de cultivo no son independientes del resto de la biodiversidad del planeta, sino que están embebidas en el mismo paisaje, y las plantas cultivadas interactúan con polinizadores, depredadores, microorganismos y otros seres vivos que viven en las parcelas o que interactúan con éstas, formando agroecosistemas. La domesticación también ha influido en la evolución de estos organismos, pues sus interacciones con plantas silvestres no son las mismas que con sus contrapartes domesticadas (Chen *et al.*, 2017; 2018). Así, la diversidad biológica que surgió como consecuencia de la domesticación incluye no sólo especies, sino también genes y ecosistemas.

La raíz de esta explosión de diversidad es doble; por un lado, la domesticación requiere de la variación biológica presente en el medio silvestre, tanto a nivel de genes como de especies, y por el otro, el hecho de que la domesticación ocurra paralelamente en varios lugares, llevada a cabo por diferentes personas, implica que la presión de selección varía conforme a los diferentes ambientes, pero también a los gustos, necesidades, preferencias y formas de manejo de diferentes culturas y personas; en otras palabras, la domesticación es un proceso bio-cultural (Boege, 2008; Casas y Parra, 2016). Por este motivo, la agrobiodiversidad no está homogéneamente distribuida a lo largo del mundo, sino que es mayor en aquellos sitios donde culturas milenarias iniciaron la domesticación y diversificación de los cultivos, y que hoy albergan la mayor riqueza de parientes silvestres, variedades de los cultivos y conocimiento tradicional (Diamond, 2012; Harlan, 1971; Vavilov, 1951).

El modelo de la revolución verde no ha resultado efectivo para enfrentar una alta heterogeneidad ambiental, pues se basa en que la selección ocurre en estaciones de investigación, mismas que difícilmente pueden cubrir la gama de condiciones de los sitios de cultivo si estas son muy variadas. Si bien esto no detiene el proceso de domesticación, sí lo constriñe a ambientes limitados. La aplicación de insumos agrícolas ha sido una forma de contrarrestar lo anterior, al volver al ambiente de siembra más parecido al de las estaciones; sin embargo, la aplicación de estos agroquímicos ha tenido las

mencionadas externalidades negativas (Cuadro 2). Es necesario, entonces, repensar el camino al que se ha llevado la domesticación moderna y buscar alternativas que sean efectivas para cada contexto ambiental, sociocultural y económico. En opinión de los autores, en esta búsqueda de alternativas no debe concebirse a la agricultura sólo como un mecanismo de producción de alimentos, que es el acercamiento normalmente propuesto desde la revolución verde, sino entenderla como parte del proceso de domesticación. Se propone, en concreto, volver a dos elementos clave de este proceso: la diversidad genética

Cuadro 2. Principales limitaciones y externalidades negativas de la agricultura bajo el modelo de la revolución verde.

- Los cultivos elite requieren suelos de alta calidad y alta disponibilidad de agua (Ceccarelli, 2009; Duvick, 2005). Como consecuencia, quienes producen en zonas agroecológicas que no están favorecidas con estas condiciones quedaron exentos de los beneficios de la revolución verde, pero no así de la baja global de precios (Evenson y Gollin, 2003). Un ejemplo es lo que ocurre en México: las condiciones ambientales características de la mayor parte del área bajo agricultura campesina del país, y particularmente de las regiones más pobres, están escasamente representadas en las estaciones de investigación que desarrollan las líneas mejoradas (Bellon *et al.*, 2005).
- Para obtener los rendimientos esperados de las líneas elite se requiere de un alto uso de fertilizantes inorgánicos; ésto, por un lado, encarece la inversión y por el otro tiene graves consecuencias para el medio ambiente, incluso más allá del sitio de aplicación de los agroquímicos. Ejemplo de esto son las vastas zonas marinas muertas que existen en la desembocadura de cada río que atraviesa zonas de agricultura intensiva (Rabalais *et al.*, 2010).
- La agricultura intensiva promueve la homogeneidad tanto a nivel específico (monocultivos) como genético (uniformidad genética que disminuye la varianza y facilita el cultivo mecanizado), lo que incrementa el riesgo de perder cosechas enteras y vuelve a los cultivos más vulnerables a plagas y enfermedades (Ullstrup, 1972). Para combatir esto se recurrió al uso de pesticidas, los cuales además de producir afectaciones serias al ambiente y a la salud humana, son constantemente superados mediante la evolución de resistencia por las plagas, llevando así a una carrera armamentista (Després *et al.*, 2007).
- Incrementar la producción efectivamente se tradujo en una mayor ingesta de calorías; sin embargo, al enfocar la selección artificial principalmente en rendimiento y favorecer los monocultivos, se propició la deficiencia de micronutrientes en comunidades agrícolas, pues dichos nutrientes se conseguían de variedades menos productivas pero más nutritivas, o bien de otros cultivos que se descartaron para enfocarse en el monocultivo de granos (FAO, 2010).
- Enfocar la producción de semillas en aquellas provenientes de líneas mejoradas pretendió trasladar el proceso de domesticación de las manos de millones de personas a un grupo reducido de investigadores y compañías semilleras (Ceccarelli, 2015; Troyer, 2009). Como resultado, en algunas partes del mundo muchas especies y variedades locales se abandonaron, o su intercambio incluso, se limitó legamente (Ceccarelli, 2009; Gepts, 2006); la capacidad para mantener, generar y aplicar el conocimiento agrícola tradicional ha comenzado a desaparecer (Gómez-Baggethun y Reyes-García, 2013) y la seguridad alimentaria de muchas regiones se ha vuelto dependiente de un número de cultivos cada vez menor (Khoury *et al.*, 2014) y cada vez más controlado por tan solo un puñado de compañías agro-industriales (Howard, 2009).

presente en las especies domesticadas, sus parientes silvestres y microbioma, y el papel de millones de pequeños productores y productoras como motor para la evolución de cultivos en condiciones ambientales diversas y difíciles.

La diversidad genética es la variación gracias a la cual los procesos evolutivos pueden ocurrir, incluido el de la domesticación. En el contexto de la agrobiodiversidad, la diversidad genética puede verse como una fuente de opciones para cultivar alimentos diversos y nutritivos con menos recursos, adaptados a ambientes más hostiles y haciendo a los cultivos menos susceptibles a plagas y enfermedades; prueba de que ésto es posible es que las plantas domesticadas ya se cultivan en una gama muy amplia de ambientes; de hecho, más amplia que el nicho de sus ancestros silvestres. Esta gama de ambientes incluye condiciones marginales donde, si bien las líneas comerciales no se desempeñan bien, hay variedades que pueden afrontarlas, pues han estado bajo selección que conduce a la adaptación local (Dwivedi *et al.*, 2016). De forma similar, los parientes silvestres de los cultivos tienden a tener una mayor diversidad genética, ya que no pasaron por el cuello de botella de la domesticación, que sus contrapartes domesticadas, particularmente en genes asociados con la resistencia a sequía, plagas y enfermedades (Maxted *et al.*, 2014). A esta diversidad se puede agregar la muy amplia diversidad de microrganismos

que coevolucionaron con las especies domesticadas, sus parientes silvestres y los ambientes donde se encuentran. Este microbioma puede influir considerablemente en el desempeño de las plantas, aunque la investigación en este sentido apenas está iniciando (Benitez *et al.*, 2017; Gopal and Gupta 2016; Qin *et al.*, 2016; Sessitsch and Mitter, 2015).

Los millones de pequeños productores y productoras, que normalmente cultivan en < 5 ha, no son sólo una fuerza productiva, sino un insustituible motor para la evolución de cultivos en condiciones ambientales diversas y difíciles. Si bien el proceso de domesticación se mantiene vigente cada vez que cualquier agricultor cultiva sus propias semillas, el éxito de la domesticación bajo evolución está en los números: el proceso no ocurre en un solo hogar, sino que lo realizan numerosas personas que juntas suman grandes extensiones de cultivos en ambientes muy diversos y con tamaños efectivos de la población bajo domesticación muy altos; por ejemplo, con base en censos agrícolas se estima que la agricultura campesina de maíz de temporal en México se realiza en alrededor de 4 millones de hectáreas, lo que se traduce en que 138 mil millones de plantas de maíz están sujetas al proceso de selección por ciclo de cultivo (en ambientes que van desde el nivel del mar hasta los 3000 m de elevación) y que de éstas, 500 millones dan origen a la semilla del siguiente ciclo (Bellon

et al., 2018). De esta forma, la agricultura campesina no sólo mantiene la diversidad existente, sino que combina en un solo sistema tres de los principales factores (gran tamaño poblacional efectivo, alta diversidad genética y amplia variación ambiental) que afectan positivamente la evolución adaptativa (Bellon *et al.*, 2018); por lo tanto, desde un punto de vista evolutivo, la mejor manera de conservar y acrecentar la diversidad genética de los cultivos es que millones de personas cultiven con sus propias semillas bajo condiciones ambientales y culturales variadas (Bellon *et al.*, 2018; Enjalbert *et al.*, 2011; Perales, 2016).

INICIATIVA PROPUESTA

Se propone una iniciativa con dos objetivos: 1) estudiar, conocer y conservar la diversidad genética de los cultivos nativos de México y sus parientes silvestres, y preservar el proceso de la evolución bajo domesticación que genera y mantiene dicha diversidad, y 2) utilizar esta diversidad para fortalecer la producción de alimentos y fibras de forma socialmente justa y minimizando los impactos ambientales (Figura 1).

Para alcanzar estos objetivos se requiere un esfuerzo nacional que impulse un proceso de investigación interinstitucional, interdisciplinario y multidisciplinario, con énfasis en la generación de bienes y servicios públicos. La CONABIO busca iniciar dicho proceso ligando a diferentes instituciones y áreas del conocimiento y generando sistemas de información de acceso y difusión. Se propone comenzar por atender grandes temáticas, o componentes, en torno a la variación disponible para la domesticación (componentes diversidad genética y genómica funcional), el contexto donde la domesticación ocurre (componentes mejoramiento y producción) y uno de los principales retos a los que se enfrenta (componente cambio ambiental). La información generada por estos componentes servirá para conectar el entendimiento teórico del proceso evolutivo de la domesticación con los aspectos prácticos de aplicar este conocimiento a la conservación y producción (Figura 1).

Para cada temática, existen ya grupos de trabajo consolidados en el país que desde hace tiempo, varias décadas en algunos casos, abordan dichas cuestiones desde las perspectivas social, económica, agronómica, genómica, climática y ambiental. A continuación, se hace una breve síntesis del estado del conocimiento en cada uno de los cinco componentes con énfasis en la información existente para México, las principales problemáticas con las que están relacionados y las preguntas de investigación que podrían abordarse de forma prioritaria.

DIVERSIDAD GENÉTICA

Este componente incluye la diversidad a nivel especies domesticadas, sus variantes agrícolas y parientes silvestres, diversidad genética y microbioma asociado. México tiene más de 130 especies que se utilizan como alimento y alrededor de 280 especies con potencial forestal (Acevedo *et al.*, 2009; FAO, 2011). Si bien las especies forestales no se encuentran domesticadas, o no por completo, se encuentran bajo manejo y mantienen una estrecha relación con la producción de materiales y alimentos de comunidades humanas. Entre los alimentos se encuentran maíz, frijol, chile (*Capsicum* spp.), calabaza (*Cucurbita* spp.), amaranto (*Amaranthus* spp.), vainilla (*Vanilla* spp.) y otros 20 cultivos de gran importancia económica en el mundo. México es el centro de domesticación o diversificación de estos y muchos otros cultivos (Sarukhán *et al.*, 2017). De cada uno de estos cultivos en México también se distribuyen decenas de parientes silvestres, de manera que tan solo de los 12 cultivos importantes del país se cuenta con más de 270 parientes silvestres (CONABIO y UICN, 2016); a su vez, dentro de cada especie domesticada hay decenas de variedades; por ejemplo, 59 razas nativas de maíz y 60 tipos de chile (Aguilar *et al.*, 2010; CONABIO, 2011). El microbioma de esas especies ha comenzado a ser explorado (*e.g.* Benitez *et al.*, 2017) pero es potencialmente muy diverso. Esta diversidad de especies silvestres, domesticadas, microorganismos y genes no es estática, está aún bajo evolución en un complejo contexto socio-ambiental que abarca del cálido nivel del mar al frío de las montañas más altas, y en manos de campesinos mestizos y de los 68 grupos indígenas presentes en el país (CDI, 2014).

La investigación relacionada con los cultivos de México ha sido desproporcionada según la especie (Figura 2). Para el maíz, existe investigación muy extensa y abarca la distribución geográfica de sus razas a lo largo de todo el país (CONABIO, 2011), la historia de su domesticación (Hufford *et al.*, 2012; Kato *et al.*, 2009), genomas completos y paneles de diversidad a nivel poblacional (*e.g.* Arteaga *et al.*, 2016; Romero *et al.*, 2017); sin embargo, para el resto de las especies la información existente es mucho más limitada (Bellon *et al.*, 2009; Piñero *et al.*, 2008), no está sistematizada o incluso no existe ni siquiera a nivel de la distribución geográfica de sus variedades.

La meta propuesta para este componente es conocer, analizar, conservar, valorar, resguardar y aprovechar sustentablemente la diversidad genética; para ello se propone comenzar por atender las siguientes problemáticas y preguntas de investigación.

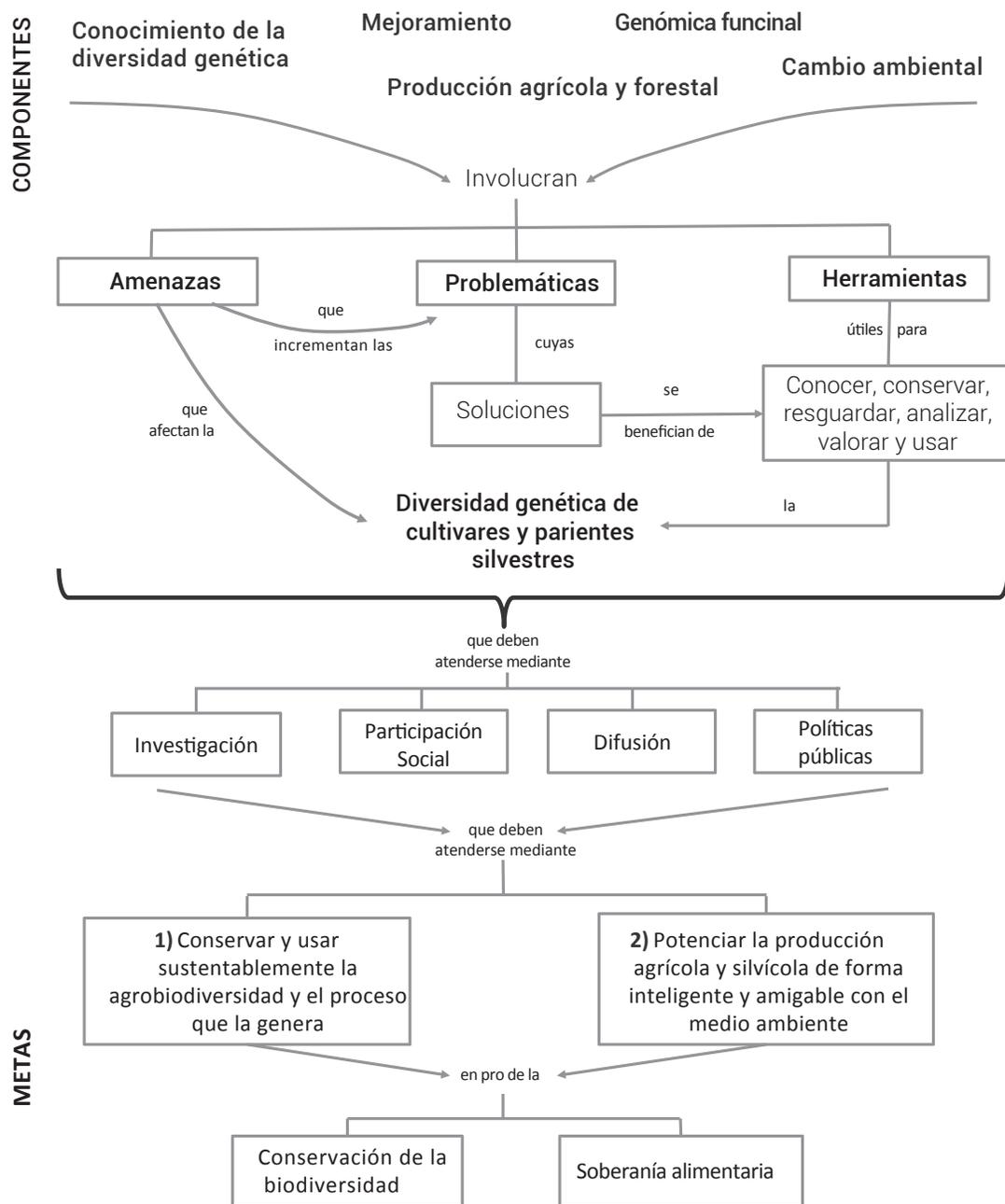


Figura 1. Metas y componentes temáticos de la iniciativa de CONABIO en torno a la diversidad de cultivos y sus parientes silvestres.

Problemáticas

- La diversidad genética se erosiona por pérdida del hábitat, prácticas de manejo inadecuadas y porque quienes la utilizan y generan están abandonando el campo.
- Los programas de conservación (*in situ* y *ex situ*) no están bien definidos ni siguen una estrategia concreta.
- No se aprovecha todo el potencial de la diversidad genética.
- No existe un sistema de información integral y sistemático que recopile y permita el acceso al conocimiento de la diversidad genética de las especies agrícolas y forestales de México.
- No se ha evaluado el impacto y éxito de las estrategias de conservación (*ex situ* e *in situ*) hasta ahora emprendidas.

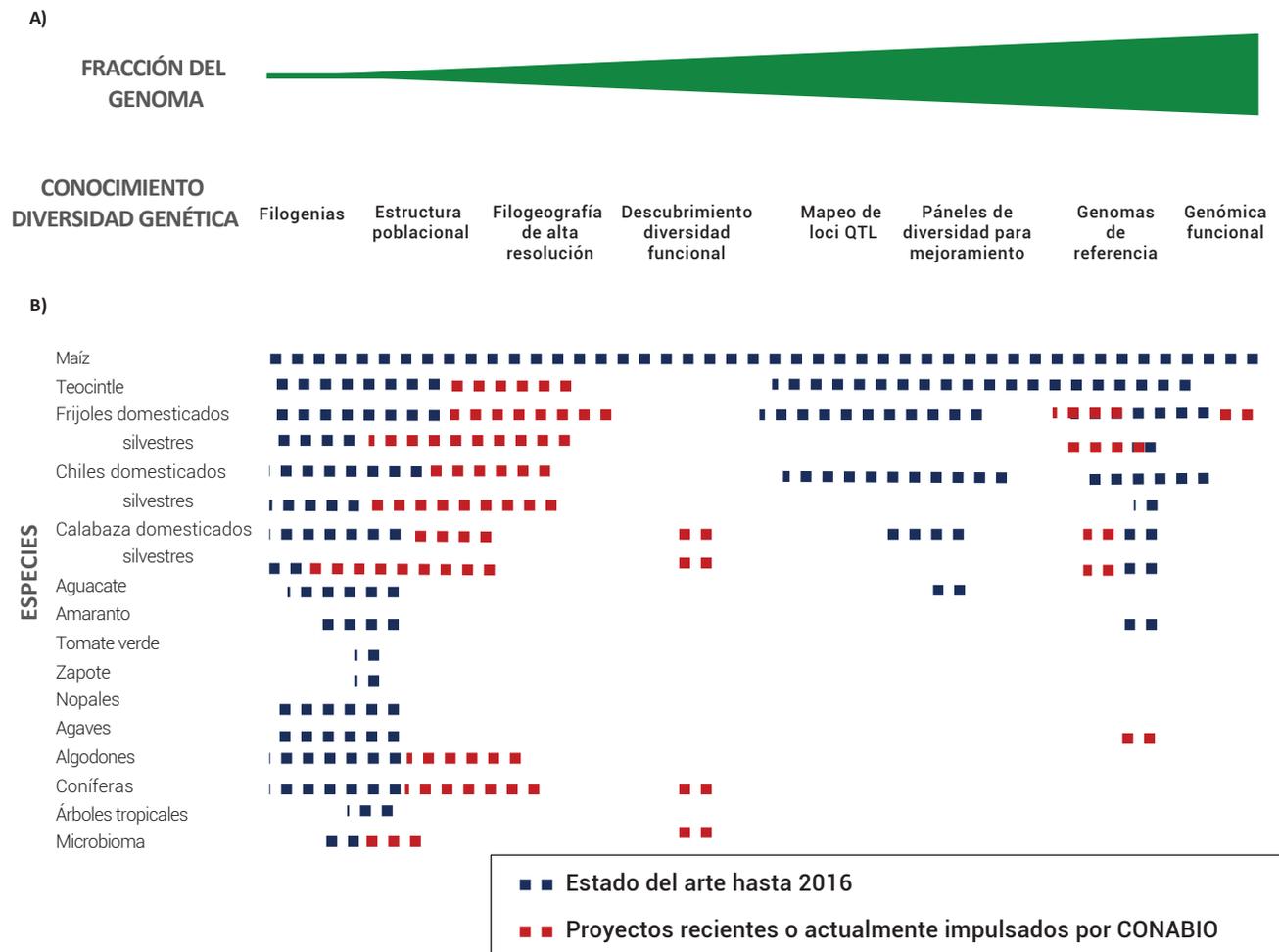


Figura 2. Estado del conocimiento de la diversidad genética por grupos de especies mexicanas y marcadores moleculares. a) De arriba a abajo se muestra la fracción del genoma (triángulo verde) al que se accede a través de diferentes marcadores moleculares para realizar diversos tipos de análisis. b) Las líneas punteadas representan el tipo de estudios que existen para cada especie según los temas de la parte superior. El tamaño de la línea es una representación aproximada del nivel de conocimiento que se tiene para cada tema.

Preguntas de investigación

1. ¿Cuál es la distribución de las variantes de plantas cultivadas y sus parientes silvestres y qué sitios faltan por colectar?
2. ¿Cuál es la distribución de la variación genética de las especies mexicanas domesticadas y sus parientes silvestres a nivel nacional tanto espacial como temporalmente?
3. ¿Cuánta variación genética hay en las poblaciones/accesiones?
4. ¿Qué áreas se pueden identificar como regiones de alta diversidad en cada una de las plantas cultivadas y sus parientes silvestres?
5. ¿Cuál es la diversidad taxonómica y metabólica del microbioma de los cultivos mexicanos?
6. ¿Cuál es el efecto del tipo de manejo, forma de

- producción (incluyendo interacciones con parientes silvestres) e intercambio de semillas en las especies de plantas cultivadas sobre su estructura genética, cantidad de variación y distribución geográfica?
7. ¿Qué estrategias y programas de conservación (*ex situ* e *in situ*) conservan exitosamente la diversidad genética?

GENÓMICA FUNCIONAL

Los estudios de genómica funcional han demostrado que los fenotipos obtenidos durante el inicio de la domesticación están gobernados por relativamente pocos genes, que en general difieren de los involucrados en la diversificación fenotípica subsecuente y de aquellos sujetos a selección natural (Meyer y Purugganan, 2013).

La investigación en este tema se ha llevado a cabo principalmente fuera de México, pero recientemente se han creado o mejorado las instituciones mexicanas que pueden enfocarse en ello. Realizar este tipo de investigación dentro del país es importante no sólo para el fortalecimiento de los recursos humanos, sino también para asegurarse de que la variación nativa de México quede representada (Caldu-Primo *et al.*, 2017; Ganal *et al.*, 2009).

La meta para este componente es contar con genomas bien ensamblados y paneles de diversidad de las principales especies agrícolas, forestales y sus parientes silvestres de México para que sean utilizados por programas de mejoramiento e investigación aplicada.

Problemáticas

- Existen recursos genómicos (es decir genomas, paneles de diversidad, entre otros) sólo para algunos cultivos icónicos a nivel internacional y no para el resto de las especies y diversidad de importancia para México.
- Escasa formación de recursos humanos en México para este campo.
- Poca o nula vinculación entre la investigación básica y su aplicación a mejoramiento y producción.

Preguntas de investigación

1. ¿Cuánta variación funcional hay dentro de la diversidad genética de las poblaciones/accesiones de las plantas domesticadas en México y sus parientes silvestres?
2. ¿Cuál es la base genética y papel de la diversidad en la adaptación a diferentes condiciones ambientales dentro de cada cultivo y sus parientes silvestres?
3. ¿Cómo transforman la domesticación y la selección artificial a los genomas?
4. ¿Cuáles son las regiones candidatas dentro de los genomas que podrían ser útiles frente a cambios en las condiciones ambientales y cuál es su base genética?
5. ¿Cuál es el efecto del tipo de manejo y forma de producción (incluyendo interacciones con parientes silvestres) en la conformación genómica de las especies domesticadas?

PRODUCCIÓN AGRÍCOLA Y FORESTAL

La mayor parte de los terrenos agrícolas y forestales de México pertenece a comunidades indígenas o campesinas. Su agricultura tiende a realizarse en parcelas de menos de 5 ha, y se les caracteriza como pequeños productores, pero esas superficies sumadas llegan a alrededor de 4.6 millones de ha (Bellon *et al.*, 2018). En el ámbito forestal, el 23 % de la superficie tiene potencial de aprovechamiento, pero sólo aporta 0.13 % del PIB nacional (SEMARNAT, 2014); la distribución de estos terrenos agrícolas y forestales

es fragmentada y va acompañada de un proceso de degradación y pérdida de recursos naturales muy serio. Se estima que el país conserva sólo 50 % de su cobertura de vegetación natural en estado primario, de eso la mayor parte corresponde a zonas áridas (Sarukhán *et al.*, 2017); por ende, el incremento en la producción de alimentos debe hacerse sin promover la expansión de la frontera agrícola ni el deterioro de los ecosistemas naturales remanentes.

Con respecto a la producción forestal, a partir de 2014 se propuso comenzar a manejar de forma sustentable 2.4 millones de hectáreas de bosques nativos y realizar plantaciones forestales en otras 143 mil hectáreas (SEMARNAT, 2014). Los efectos de este manejo pueden influir positiva o negativamente en la capacidad de adaptación local (actual y bajo escenarios de cambio climático) de las poblaciones, y por ende, tener consecuencias tanto para la producción forestal como para los bosques (Ratnam *et al.*, 2014; Unger *et al.*, 2014). La generación de información genética que permita analizar estos procesos es fundamental para su manejo adecuado y conservación.

En cuanto a la producción agrícola, es necesario destacar el papel de las y los millones de pequeños productores como una fuerza productiva, pues aunque la agricultura campesina, incluyendo pueblos mestizos e indígenas, es percibida como improductiva dado sus bajos rendimientos a nivel individual, es en realidad la columna vertebral de la seguridad alimentaria de México (Bellon *et al.*, 2018); por ejemplo, a nivel nacional se estima que el maíz producido por la agricultura campesina potencialmente puede alimentar a 54.7 millones de personas, lo que es suficiente para cubrir a toda la población rural con excedentes para alimentar otros 28.7 millones de personas (Bellon *et al.*, 2018). A pesar de esto, desde la década de los 1980s los programas dirigidos a los campesinos disminuyeron drásticamente o se redireccionaron para proveer de paquetes de la revolución verde (Turrent-Fernández y Cortés-Flores, 2005b); sin embargo, muchos campesinos y campesinas continúan utilizando sus variedades tradicionales (Eakin *et al.*, 2014), ya que éstas son adecuadas y competitivas cuando son sembradas en sus condiciones locales (Muñoz *et al.*, 1976), y porque no sólo se enfocan en rendimiento, sino en satisfacer sus preferencias y necesidades culturales (Bellon and Hellin, 2011; Brush y Perales, 2007). Destaca que la agricultura campesina logra producir incluso en ambientes marginados, sin ayuda, a pesar de políticas públicas contrarias (Bellon *et al.*, 2018). Esto implica que la brecha de productividad de muchos campesinos podría disminuirse con pequeñas mejorías agronómicas que en lo agregado podrían tener enormes beneficios.

La meta de este componente es atender la producción

agrícola y forestal de México de manera que pueda incrementarse de forma soberana y sustentable, al tiempo que se satisfacen las necesidades mexicanas respecto al tipo de cultivos, cantidad, calidad y preferencias culturales y se evita la extensión de la frontera agrícola. Para lograr esto es crucial proteger la producción campesina y atenderla con programas adecuados que consideren no sólo el manejo, sino también el mercado y la educación.

Problemáticas

- La inversión pública no ha estado dirigida a donde más se necesita, sino que se ha focalizado hacia grandes productores con enfoque agro-industrial.
- Los programas de apoyo son homogéneos y faltan incentivos para producir y conservar.
- Envejecimiento y migración de la fuerza laboral rural.
- No se aprovecha el potencial forestal de México.
- La deforestación y degradación ambiental han sido muy altas en las últimas décadas y no es posible expandir más la frontera agrícola.

Preguntas de investigación

1. ¿Cuáles son los usos tradicionales, gastronómicos, industriales, entre otros, actuales y potenciales de la agrobiodiversidad y de los productos derivados de ella?
2. ¿Cómo influye el microbioma en la producción bajo diferentes ambientes y sistemas de manejo?
3. ¿De qué manera las condiciones socioeconómicas, políticas públicas y formas de manejo a nivel nacional, estatal y municipal favorecen o limitan la producción agrícola y forestal sustentable?
4. ¿Qué condiciones de manejo local son adecuadas socialmente y contribuyen al incremento del nivel de vida de los productores y sus familias?
5. ¿Está la agrobiodiversidad asociada en forma positiva con la seguridad alimentaria de los hogares que la mantienen?
6. ¿Cuál es el papel de la agrobiodiversidad para la cultura y subsistencia de las zonas rurales?
7. ¿Cómo hacer recomendaciones de manejo efectivas caso por caso considerando la amplia distribución y diversidad de condiciones de la agricultura campesina?

MEJORAMIENTO

El mejoramiento formal fue introducido a México siguiendo el modelo de Estados Unidos de América; sin embargo, a la fecha en México la mayoría de la producción agrícola campesina no utiliza semillas

mejoradas (Turrent-Fernández y Cortés-Flores, 2005a; 2005b). Esto puede interpretarse como una limitante para el mejoramiento formal, pero también como el éxito de las prácticas de domesticación campesinas. Las líneas mejoradas no han sido ampliamente adoptadas por diversas razones, una de ellas es que los ambientes y sistemas de producción de la agricultura campesina no han sido suficientemente representados en las estaciones de investigación (Bellon *et al.*, 2005), lo que hace que las líneas mejoradas no sean tan útiles bajo las condiciones de los campesinos. Otra razón es que los objetivos de selección de los y las campesinas pueden variar dependiendo de las características del ambiente local e intereses personales, que no necesariamente son maximizar el rendimiento. Por estas razones, en las áreas y condiciones donde las variedades tradicionales se siembran, éstas suelen tener un desempeño mejor que las líneas mejoradas en términos de rendimiento, valor nutricional, calidad como forraje, apreciación local del sabor o precocidad (Muñoz *et al.*, 1976; Perales *et al.*, 1998).

Considerando la gran amplitud de condiciones ambientales donde ocurre la agricultura campesina en México y el limitado éxito que ha tenido el mejoramiento formal para muchos ambientes donde ocurre la agricultura campesina en el país, es poco probable que el mejoramiento con un enfoque comercial se vuelva repentinamente exitoso bajo las condiciones de la agricultura campesina. En vez de esto, en México deberíamos reconocer e incorporar al mejoramiento la diversidad y el conocimiento tradicionales, así como los procesos que permiten que la domesticación ocurra en una gama amplia de ambientes y tamaños poblacionales grandes. Para esto, las políticas públicas podrían redirigirse a apoyar el mejoramiento participativo y el mejoramiento informal (selección campesina, intercambio de semillas, entre otros) y a enfocar el mejoramiento formal hacia las necesidades y condiciones de las y los pequeños productores. Lo anterior debe considerar incorporar las variedades locales como material base en los programas de mejoramiento y no sólo como donadores de genes.

La meta para este componente es desarrollar programas de mejoramiento para una gama de especies nativas, que utilicen nuevas herramientas (genómicas, participativas, evolutivas, campesino-campesino) que aceleren y mejoren el proceso incorporando un cambio de visión, donde el objetivo sea que el mejoramiento incluya la capacidad de adaptación a las condiciones locales presentes y futuras y necesidades particulares de productores y consumidores.

Problemática

- Hay pocos esfuerzos de mejoramiento en México dirigidos a las condiciones de la agricultura campesina, y no cuentan con apoyo suficiente.
- El mejoramiento está enfocado principalmente en maíz y frijol y no existe o es muy escaso para muchos cultivos y atributos cultural o gastronómicamente importantes para México.
- No se están incorporando nuevas herramientas (genómicas, participativas, evolutivas, campesino-campesino) que aceleren y mejoren el proceso de mejoramiento.
- Escasa formación de recursos humanos en México para este campo.

Preguntas de investigación

1. ¿Cuáles son las necesidades actuales y futuras de los pequeños productores en términos agronómicos (manejo y mejoramiento) para mejorar su producción?
2. ¿Cuáles son los fenotipos útiles ante condiciones ambientales adversas hacia los que debe enfocarse el mejoramiento a nivel local y regional?
3. ¿Cuáles son las oportunidades y limitantes para utilizar nuevas herramientas (genómicas, participativas, evolutivas, campesino-campesino) en el mejoramiento en México?
4. ¿En qué condiciones el mejoramiento participativo contribuye a la conservación de los recursos genéticos y el empoderamiento de las comunidades campesinas?
5. ¿Qué estrategias deben seguirse para resolver las necesidades agronómicas de las y los campesinos?
6. ¿Cómo puede apoyarse, de forma efectiva, el mejoramiento informal como selección campesina, intercambio de semillas, entre otros?

CAMBIO AMBIENTAL

La producción agrícola y forestal de México está enfrentando fuertes cambios ambientales en la forma de degradación del suelo, contaminación, introducción de especies invasoras, cambio climático y disminución de los servicios ambientales, debido a la fragmentación y degradación de los ecosistemas naturales. Es difícil generalizar cómo el cambio ambiental afecta en la producción de una especie en particular; por ejemplo, el efecto del cambio climático sobre el maíz no es homogéneo dentro de la especie, sino que depende del genotipo de la planta, el ambiente local y el manejo (Mercer and Perales, 2010); sin embargo, se sabe que el cambio en las condiciones ambientales ha tenido importantes impactos a nivel económico. En el caso de la degradación del suelo, el equivalente al 50 % del costo del programa Proagro

Productivo es para atender el problema de erosión que presentan 10 % de los terrenos agrícolas del país (Cotler *et al.*, 2011; Sánchez *et al.*, 2009); por lo tanto, aunque es difícil predecir las condiciones exactas que existirán en una localidad específica en el futuro, se sabe que estos cambios ambientales afectarán la producción de alimentos y fibras; Por ende, los esfuerzos de mejoramiento deben dirigirse no sólo al presente, sino a mantener la diversidad para contar con opciones para enfrentar las condiciones del futuro. Por lo anterior, la meta de este componente es acelerar la adaptación de las plantas cultivadas al cambio ambiental y buscar los mecanismos que permitan conservar la capacidad de adaptación de las poblaciones silvestres.

Problemática

- No existen mapas de alta resolución de la degradación y contaminación de los suelos.
- Los modelos globales de cambio climático no predicen con exactitud y alta resolución las condiciones climáticas del futuro.
- El cambio climático es una amenaza a todas las plantas cultivadas y sus parientes silvestres, independientemente del tipo de manejo y sistema de producción.
- Las prácticas de manejo e intercambio de semillas actuales pueden no ser suficientes para brindar a las y los campesinos variación genética suficiente para adaptar sus cultivos a cambios ambientales drásticos.
- El cambio ambiental está ocurriendo más rápido que la capacidad natural de adaptación de las especies.

Preguntas de investigación

1. ¿Cuáles son las condiciones climáticas donde actualmente se cultivan las especies de interés y dónde se distribuyen sus parientes silvestres?
2. ¿Cuál será la distribución geográfica presente y la potencial bajo escenarios de cambio climático de los cultivos de México y sus parientes silvestres?
3. ¿Qué genotipos dentro de cada cultivo y parientes silvestres están vinculados a la adaptación local a las diversas condiciones ambientales de México?
4. ¿Existen prácticas tradicionales asociadas a la adaptación de los cultivos a condiciones ambientales difíciles?
5. ¿Existen en México variedades de cultivos que se siembren en condiciones climáticas actuales que sean análogas a las predichas para las condiciones futuras en otras partes del país?
6. ¿Puede asistirse al intercambio de semillas y al mejoramiento informal para que brinden a las y los campesinos la diversidad necesaria para enfrentar el cambio ambiental?

RUTA CRÍTICA

La CONABIO busca promover cada uno de los cinco componentes en función del estado de su desarrollo y de los temas considerados prioritarios; sin embargo, para que esto ocurra a escala nacional es necesario primero atender las principales problemáticas transversales a todos los componentes:

1. Existe una fuerte desvinculación entre lo que se necesita para solucionar los problemas nacionales y lo que se investiga. Esto puede solucionarse promoviendo más la investigación participativa y dirigiendo mejor el financiamiento público.
2. Ha ocurrido una importante pérdida en la capacidad de las instituciones públicas debido a problemas de financiamiento y visión sectorial, tendencia que debe revertirse.
3. La investigación debe dirigirse a la generación de bienes y servicios públicos a nivel de capacidades humanas, recursos genéticos (semillas) y conocimiento, lo que es contrario a la actual tendencia hacia la privatización.
4. La formación de recursos humanos debe contemplar un enfoque multidisciplinario, que involucre tanto el uso de las nuevas tecnologías como estrategias participativas y un sólido componente social. Esto podría hacerse a través de nuevas líneas de posgrado que vinculen áreas biológicas, agronómicas y sociales.

En paralelo a la atención de las problemáticas previas, la visión de los autores es que la CONABIO puede contribuir al desarrollo de esta iniciativa en los siguientes pasos iniciales:

1. Desarrollo de proyectos de investigación en torno a la diversidad genética de cultivos mexicanos y sus parientes silvestres.
2. Desarrollo de un sistema de información que permita sistematizar, analizar, resguardar y hacer pública la información sobre la agrobiodiversidad.
3. Incremento en cantidad y calidad de la colaboración entre grupos de investigación, organizaciones civiles, asociaciones de productores e instituciones educativas para acelerar la investigación participativa y la formación de recursos humanos.
4. Implementación de recomendaciones de políticas públicas e investigación participativa congruente con la realidad mexicana y las necesidades campesinas.

AVANCES

- Estudio realizado para *The Economics of Ecosystems & Biodiversity* (TEEB) sobre valoración del maíz relativa

a los sistemas de producción en el mundo. Se centra en tres casos para ilustrar cómo es que los diferentes sistemas productivos de maíz afectan la diversidad genética de la que dependen. Los países analizados en particular fueron México, como centro de origen y centro de diversidad genética de maíz, Ecuador como país que aún cuenta con variabilidad genética de maíces y Estados Unidos de América que cuenta con muy poca de dicha variabilidad. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/genes/valoracion.html>

- Estudio de las contribuciones de la agricultura campesina a la alimentación y evolución del maíz. Estudio publicado en Bellon *et al.* (2018). Se analiza a nivel nacional la producción de maíz de temporal para determinar la extensión y alcance de la agricultura de maíz, sus implicaciones para la seguridad alimentaria y la generación de servicios evolutivos. En un artículo de seguimiento (Bellon *et al.*, en preparación) se analizarán los factores que influyen en la siembra campesina de maíz más allá de la subsistencia.
- Proyecto Salvar los parientes silvestres de cultivos mesoamericanos. La CONABIO, junto con un grupo de países de Mesoamérica, con el liderazgo de la UICN y la Iniciativa Darwin del Reino Unido, lideró un proyecto en relación con los parientes silvestres de cultivos de importancia originarios de la región. El objetivo principal fue examinar la categorización de los riesgos a los que están sujetas estas especies y subespecies, al igual que plantear propuestas encaminadas a su conservación. Resultados disponibles en: https://www.biodiversidad.gob.mx/biodiversidad/agrobiodiversidad/psmesoamerica/es/Prácticas_Amigables_con_la_Biodiversidad.
- Prácticas Amigables con la Biodiversidad. A partir de un proyecto planteado al Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF por sus siglas en inglés) llamado Sistemas Productivos Sostenibles y Biodiversidad que finalizó en marzo 2018 se desarrolló el concepto de Prácticas Amigables con la Biodiversidad en seis sistemas productivos y un servicio. Estas prácticas van acompañadas de un sistema de verificación y buscan ser un mecanismo de apoyo a organizaciones en sus prácticas y vínculos a mercados. Resultados en <https://www.biodiversidad.gob.mx/corredor/SPSB/>
- Acciones Complementarias al PROMAC. A partir de un recurso provisto por la CONANP y junto con la misma, la CONABIO agrupó las experiencias exitosas de conservación de la agrobiodiversidad para proveer de elementos a la CONANP en sus esfuerzos de conservación de los maíces nativos de México al igual que ayudar a redireccionarlos hacia el apoyo de las diversas especies que conforman los agroecosistemas tradicionales de México que subsisten en áreas naturales protegidas.
- Proyecto Marca Colectiva de Maíces Nativos. La

CONABIO recientemente apoyó la formulación de una propuesta que busca ayudar a vincular a pequeños productores de maíces nativos a mercados culinarios. El modelo a prueba es acercar el conocimiento de un grupo extenso de expertos de múltiples disciplinas conformados en una A. C. llamada ProMaíz Nativo, para apoyar a organizaciones formadas de productores para que tengan la capacidad de ofertar los maíces de calidad en mercados especializados bajo el paraguas de una nueva marca colectiva.

- Alimentando a México sin deforestar. Herramienta para mejorar la toma de decisiones con respecto a los subsidios e incentivos agropecuarios y ambientales manejados respectivamente por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) y por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Consiste en un mapa interactivo con la cobertura de suelo de la República Mexicana y otras capas sobre biodiversidad, aunada a una plataforma de consulta de subsidios e incentivos concurrentes. Más información en https://usp.funcionpublica.gob.mx/html/Documentacion-DGDHSPC/archivosPNAP/Trabajo_3_gradoPNAP2018_SEMARNAT.pdf
- Atlas de Naturaleza y sociedad. Herramienta web para exponer mapas interactivos con texto narrativo, imágenes y contenido multimedia, para visualizar la información y los resultados más importantes de los proyectos de la CONABIO en forma atractiva y fácil de leer e interpretar. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/atlas/>
- Mapeo digital de suelos. La CONABIO se encuentra implementando un sistema de inferencia espacial para crear continuos nacionales de propiedades del suelo, con base en información patrimonial de libre acceso y del consorcio GlobalSoilmap.net. Esto permitirá generar un paquete de propiedades del suelo espacialmente explícitas, con uso potencial en sistemas agrícolas.
- Proyecto GEF "Salvaguardando la agricultura mundial a través de conocer y conservar los agroecosistemas tradicionales de México". Este proyecto lleva casi un año desde su arranque con un término de cinco años y pretende influir a través de la política pública en México el fomento a la agricultura tradicional. El planteamiento del proyecto está disponible en: https://www.biodiversidad.gob.mx/biodiversidad/agrobiodiversidad_pgef.html
- Sistema de Información de Agrobiodiversidad. La CONABIO está desarrollando un software que permita resguardar, sistematizar, conectar, hacer pública y ligar entre sí datos sobre proyectos en torno a la agrobiodiversidad (colectas, datos genéticos, datos de nutrición, etc.) que actualmente se encuentran

dispersos y que son difíciles de ligar entre sí.

- Proyectos de investigación en diversidad genética. Desde el 2012 la CONABIO ha apoyado y colaborado con varias instituciones mexicanas (UNAM, INIFAP, LANGEPIO, ECOSUR, INECOL, CIATEJ, entre otros) para generar información genética de cultivos de México y sus parientes silvestres. Desde el 2016 se han impulsado en particular proyectos genómicos (Figura 2).
- Creación del área Agrobiodiversidad. La CONABIO ha decidido reorientar algunos de sus esfuerzos relacionados a la agrobiodiversidad y a los productos comunitarios; es por ello que en marzo de este año se amalgamaron dos áreas que abordan estos temas constituyendo la nueva Coordinación General de Agrobiodiversidad y Recursos Biológicos. En ella actualmente se concentran los esfuerzos planteados en esta propuesta, aunque otras áreas de CONABIO también participan en que ésta sea exitosa. Ver información de agrobiodiversidad en <https://www.biodiversidad.gob.mx/biodiversidad/agrobiodiversidad.html>

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo G. F., E. Huerta O., S. Lorenzo A. y S. Ortiz (2009) La bioseguridad en México y los organismos genéticamente modificados: cómo enfrentar un nuevo desafío. In: Capital Natural de México. Vol. II: Estado de Conservación y Tendencias de Cambio. CONABIO. México, D.F. pp:319-353.
- Aguilar R. V. H., T. Corona T., P. López L., L. Latournerie M., M. Ramírez M., H. Villalón M. y J. A. Aguilar C. (2010) Los Chiles de México y su Distribución. SINAREFI, Colegio de Posgraduados, INIFAP, IT-Conkal, UANL, UAN. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. 114 p.
- Arteaga M. C., A. Moreno-Letelier, A. Mastretta-Yanes, A. Vázquez-Lobo, A. Breña-Ochoa, A. Moreno-Estrada, L. E. Eguiarte and D. Piñero (2016) Genomic variation in recently collected maize landraces from Mexico. *Genomics Data* 7:38-45, <https://doi.org/10.1016/j.gdata.2015.11.002>
- Cotler H., C. A. López, S. Martínez-Trinidad (2011) ¿Cuánto nos cuesta la erosión de suelos? Aproximación a una valoración económica de la pérdida de suelos agrícolas en México. *Investigación Ambiental* 3:31-43
- Baranski M. R. (2015) Wide adaptation of Green Revolution wheat: international roots and the Indian context of a new plant breeding ideal, 1960-1970. *Studies in History Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 50:41-50, <https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2015.01.004>
- Baute G. J., N. C. Kane, C. J. Grassa, Z. Lai and L. H. Rieseberg (2015) Genome scans reveal candidate domestication and improvement genes in cultivated sunflower, as well as post-domestication introgression with wild relatives. *New Phytologist* 206:830-838, <https://doi.org/10.1111/nph.13255>
- Bellon M. R., A. F. Barrientos-Priego, P. Colunga-GarcíaMarín, H. Perales, J. A. Reyes A., R. Rosales S. y D. Zizumbo-Villarreal (2009) Diversidad y conservación de recursos genéticos en plantas cultivadas. In: Capital Natural de México. Vol. II: Estado de Conservación y Tendencias de Cambio. CONABIO. México, D.F. pp:355-382.
- Bellon M. R. and J. Hellin (2011) Planting hybrids, keeping landraces: agricultural modernization and tradition among small-scale maize farmers in Chiapas, Mexico. *World Development* 39:1434-1443, <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2010.12.010>

- Bellon M. R., D. Hodson, D. Bergvinson, D. Beck, E. Martínez-Romero and Y. Montoya (2005) Targeting agricultural research to benefit poor farmers: relating poverty mapping to maize environments in Mexico. *Food Policy* 30:476–492, <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2005.09.003>
- Bellon M. R., A. Mastretta-Yanes, A. Ponce-Mendoza, D. Ortiz-Santamaría, O. Oliveros-Galindo, H. Perales, F. Acevedo and J. Sarukhán (2018) Evolutionary and food supply implications of ongoing maize domestication by Mexican campesinos. *Proceedings of the Royal Society B. Biological Sciences* 285:20181049, <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.1049>
- Benitez M. S., S. L. Osborne and R. M. Lehman (2017) Previous crop and rotation history effects on maize seedling health and associated rhizosphere microbiome. *Scientific Reports* 7:15709, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15955-9>
- Boege E. (2008) El Patrimonio Biocultural de los Pueblos Indígenas de México. Hacia la Conservación *in situ* de la Biodiversidad y Agrodiversidad en los Territorios Indígenas. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México, D.F. 344 p.
- Brush S. B. and H. R. Perales (2007) A maize landscape: ethnicity and agrobiodiversity in Chiapas Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 121:211–221, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.018>
- Caldu-Primo J. L., A. Mastretta-Yanes, A. Wegier and D. Piñero (2017) Finding a needle in a haystack: distinguishing Mexican maize landraces using a small number of SNPs. *Frontiers in Genetics* 8:45, <https://doi.org/10.3389/fgene.2017.00045>
- Casas A. y F. Parra (2016) La domesticación como proceso evolutivo. *In: Domesticación en el Continente Americano*. Vol. 1. Manejo de Biodiversidad y Evolución Dirigida por las Culturas del Nuevo Mundo. A. Casas, J. Torres-Guevara y F. Parra (eds.). Universidad Nacional Autónoma de México-Universidad Nacional Agraria La Molina del Perú. Lima, Perú. pp:133–150.
- Casas A., J. Torres-Guevara y F. Parra (2016) Domesticación en el Continente Americano. Vol. 1. Manejo de Biodiversidad y Evolución Dirigida por las Culturas del Nuevo Mundo. Universidad Nacional Autónoma de México-Universidad Nacional Agraria La Molina del Perú. Lima, Perú. 504 p.
- CDI, Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (2014) Programa Especial de los Pueblos Indígenas 2014–2018. Diario Oficial de la Federación, Décima Sección, 30 de abril de 2014. México, D.F. pp:57–112.
- Ceccarelli S. (2009) Evolution, plant breeding and biodiversity. *Journal of Agriculture and Environment for International Development* 103:131–145.
- Ceccarelli S. (2015) Efficiency of plant breeding. *Crop Science* 55:87–97, <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.02.0158>
- Chen Y. H., J. Ruiz-Arocho and E. J. B. von Wettberg (2018) Crop domestication: anthropogenic effects on insect-plant interactions in agroecosystems. *Current Opinion in Insect Science* 29:56–63, <https://doi.org/10.1016/j.cois.2018.06.004>
- Chen Y. H., L. R. Shapiro, B. Benrey and A. Cibrián-Jaramillo (2017) Back to the origin: *in situ* studies are needed to understand selection during crop diversification. *Frontiers in Ecology and Evolution* 5:125, <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00125>
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2011) Proyecto Global de Maíces Nativos. Recopilación, generación, actualización y análisis de información acerca de la diversidad genética de maíces y sus parientes silvestres en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F. 75 p.
- CONABIO-UICN, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (2016) Lista preliminar de parientes silvestres de cultivos de México. *In: Resultados del Primer Taller del Proyecto Salvaguardando los Parientes Silvestres de Plantas Cultivadas*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México.
- Crow J. F. (1998) 90 years ago: the beginning of hybrid maize. *Genetics* 148:923–928.
- Darwin C. (1859) On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life. John Murray. London, U.K. 502 p.
- Després L., J. P. David and C. Gallet (2007) The evolutionary ecology of insect resistance to plant chemicals. *Trends in Ecology and Evolution* 22:298–307, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.02.010>
- Diamond J. (1997) Guns, Germs and Steel: A Short History of Everybody for the Last 13,000 Years. Vintage Books USA. New York, USA. 480 p.
- Diamond J. (2012) The local origins of domestication. *In: Biodiversity in Agriculture. Domestication, Evolution and Sustainability*. P. Gepts, T. R. Famula, R. L. Bettinger, S. B. Brush, A. B. Damania, P. E. McGuire and C. O. Qualset (eds.). Cambridge University Press. Cambridge, UK. pp:9–18, <https://doi.org/10.1017/CBO9781139019514.003>
- Duvick D. N. (2005) The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). *Advances in Agronomy* 86:83–145, [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)86002-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)86002-X)
- Dwivedi S. L., S. Ceccarelli, M. W. Blair, H. D. Upadhyaya, A. K. Are and R. Ortiz (2016) Landrace germplasm for improving yield and abiotic stress adaptation. *Trends in Plant Science* 21:31–42, <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.10.012>
- Eakin H., H. Perales, K. Appendini and S. Sweeney (2014) Selling maize in Mexico: The persistence of peasant farming in an era of global markets. *Development and Change* 45:133–55, <https://doi.org/10.1111/dech.12074>
- Enjalbert J., J. C. Dawson, S. Paillard, B. Rhoné, Y. Roussele, M. Thomas and I. Goldringer (2011) Dynamic management of crop diversity: from an experimental approach to on-farm conservation. *Comptes Rendus Biologies* 334:458–468, <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2011.03.005>
- Evenson R. E. and D. Gollin (2003) Assessing the impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. *Science* 300:758–762, <https://doi.org/10.1126/science.1078710>
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2010) The State of Food Insecurity in the World: Addressing Food Insecurity in Protracted Crises. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 58 p.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2011) Situación de los Recursos Genéticos Forestales en México. Informe Final del Proyecto TCP/MEX/3301/MEX (4). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Mexico, D. F. 282 p.
- Ganal M. W., T. Altmann and M. S. Röder (2009) SNP identification in crop plants. *Current Opinion in Plant Biology* 12:211–217, <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2008.12.009>
- Gepts P. (2006) Plant genetic resources conservation and utilization: the accomplishments and future of a societal insurance policy. *Crop Science* 46:2278–2292, <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.03.0169gas>
- Gómez-Baggethun E. and V. Reyes-García (2013) Reinterpreting change in traditional ecological knowledge. *Human Ecology* 41:643–647, <https://doi.org/10.1007/s10745-013-9577-9>
- Gopal M. and A. Gupta (2016) Microbiome selection could spur next-generation plant breeding strategies. *Frontiers in Microbiology* 7:1971, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01971>
- Guerra-García A., M. Suárez-Atilano, A. Mastretta-Yanes, A. Delgado-Salinas and D. Piñero (2017) Domestication genomics of the open-pollinated scarlet runner bean (*Phaseolus coccineus* L.). *Frontiers in Plant Science* 8:1891, <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01891>
- Harlan J. R. (1971) Agricultural origins: centers and noncenters. *Science* 174:468–474, <https://doi.org/10.1126/science.174.4008.468>
- Harlan J. R. (1975) Our vanishing genetic resources. *Science* 188:617–621, <https://doi.org/10.1126/science.188.4188.617>
- Harlan J. R., J. M. J. de Wet and E. G. Price (1973) Comparative evolution of cereals. *Evolution* 27:311–325, <https://doi.org/10.2307/2406971>
- Howard P. H. (2009) Visualizing consolidation in the global seed industry: 1996–2008. *Sustainability* 1:1266–1287, <https://doi.org/10.3390/su1041266>
- Hufford M. B., X. Xu, J. van Heerwaarden, T. Pyhäjärvi, J-M Chia, R. A. Cartwright, ... J. Ross-Ibarra (2012) Comparative population genomics of maize domestication and improvement. *Nature Genetics* 44:808–811, <https://doi.org/10.1038/ng.2309>
- Kahane R., T. Hodgkin, H. Jaenicke, C. Hoogendoorn, M. Hermann, J. D. H. (Dyno) Keatinge, J. A. Hughes, S. Padulosi and N. Looney (2013) Agrobiodiversity for food security, health and income. *Agronomy for Sustainable Development* 33:671–693, <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0147-8>
- Kato Y. T. A., C. Mapes S., L. M. Mera O., J. A. Serratos H., R. A. Bye B. (2009) Origen y Diversificación del Maíz: Una Revisión Analítica. UNAM, CONABIO. México, D.F. 116 p.

- Khoury C. K., A. D. Bjorkman, H. Dempewolf, J. Ramirez-Villegas, L. Guarino, A. Jarvis, L. H. Rieseberg and P. C. Struik (2014) Increasing homogeneity in global food supplies and the implications for food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111:4001-4006, <https://doi.org/10.1073/pnas.1313490111>
- Khush G. S. (2001) Green revolution: the way forward. *Nature Reviews Genetics* 2:815-822, <https://doi.org/10.1038/35093585>
- Maxted N., B. V. Ford-Lloyd, S. Jury, S. Kell and M. Scholten (2006) Towards a definition of a crop wild relative. *Biodiversity and Conservation* 15:2673-2685, <https://doi.org/10.1007/s10531-005-5409-6>
- Maxted N., S. Kell and J. M. Brehm (2014) Crop wild relatives and climate change. In: *Plant Genetic Resources and Climate Change*. M. Jackson, B. Ford-Lloyd and M. Parry (eds.). CABI International. Wallingford, U.K. pp:114-136.
- Mercer K. L. and H. R. Perales (2010) Evolutionary response of landraces to climate change in centers of crop diversity. *Evolutionary Applications* 3:480-493, <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00137.x>
- Meyer R. S., A. E. DuVal and H. R. Jensen (2012) Patterns and processes in crop domestication: an historical review and quantitative analysis of 203 global food crops. *New Phytologist* 196:29-48, <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04253.x>
- Meyer R. S. and M. D. Purugganan (2013) Evolution of crop species: genetics of domestication and diversification. *Nature Reviews Genetics* 14:840-852, <https://doi.org/10.1038/nrg3605>
- Mulvany P. (2017) Agricultural biodiversity is sustained in the framework of food sovereignty. *Biodiversity* 18:84-91, <https://doi.org/10.1080/14888386.2017.1366872>
- Muñoz O. A., A. Carballo C. y V. A. González H. (1976) Mejoramiento del maíz en el CIAMEC. I. Análisis crítico y reenfoque del programa. In: *Memoria del VI Congreso Nacional de Fitogenética*. Sociedad Mexicana de Fitogenética. 25, 26, 27 y 28 de julio. Monterrey, N. L., México. pp:124-130.
- Perales H. (2016) Landrace conservation of maize in Mexico: an evolutionary breeding interpretation. In: *Enhancing Crop Genepool Use. Capturing Wild Relative and Landrace Diversity for Crop Improvement*. N. Maxted, M. E. Dooloo and B. V. Ford-Lloyd (eds.). CABI International. Wallingford, U.K. pp:271-281.
- Perales H., R. S. B. Brush and C. O. Qualset (1998) Agronomic and economic competitiveness of maize landraces and *in situ* conservation in Mexico. In: *Farmers Gene Banks and Crop Breeding: Economic Analyses of Diversity in Wheat Maize and Rice*. M. Smale (ed.). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. pp:109-126, https://doi.org/10.1007/978-94-009-0011-0_7
- Piñero D., J. Caballero-Mellado, D. Cabrera-Toledo, C. E. Canteros, A. Casas, A. Castañeda S., ... y G. Zúñiga (2008) La diversidad genética como instrumento para la conservación y el aprovechamiento de la biodiversidad: estudios en especies mexicanas. In: *Capital Natural de México*. Vol. I. Conocimiento Actual de la Biodiversidad. CONABIO. México, D.F. pp:437-494.
- Pingali P. L. (2012) Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109:12302-12308, <https://doi.org/10.1073/pnas.0912953109>
- Qin Y., I. S. Druzhinina, X. Pan and Z. Yuan (2016) Microbially mediated plant salt tolerance and microbiome-based solutions for saline agriculture. *Biotechnology Advances* 34:1245-1259, <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.08.005>
- Rabalais N. N., R. J. Díaz, L. A. Levin, R. E. Turner, D. Gilbert and J. Zhang (2010) Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia. *Biogeosciences* 7:585-619, <https://doi.org/10.5194/bg-7-585-2010>
- Ratnam W., O. P. Rajora, R. Finkeldey, F. Aravanopoulos, J. M. Bouvet, R. E. Vaillancourt, M. Kanashiro, B. Fady, M. Tomita and C. Vinson (2014) Genetic effects of forest management practices: global synthesis and perspectives. *Forest Ecology and Management* 333:52-65, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.008>
- Romero N. J. A., M. Willcox, J. Burgueño, C. Romay, K. Swarts, S. Trachsel, ... and E. S. Buckler (2017) A study of allelic diversity underlying flowering-time adaptation in maize landraces. *Nature Genetics* 49:476-480, <https://doi.org/10.1038/ng.3784>
- Sánchez C. S., A. Flores M., I. A. Cruz-Leyva y A. Velázquez (2009) Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. In: *Capital Natural de México*. Vol. II: Estado de Conservación y Tendencias de Cambio. CONABIO. México, D.F. pp:75-129.
- Sarukhán J., P. Koleff, J. Carabias, J. Soberón, R. Dirzo, J. Llorente-Bousquets, ... y G. García M. (2017) *Capital Natural de México*. Síntesis. Evaluación del Conocimiento y Tendencias de Cambio, Perspectivas de Sustentabilidad, Capacidades Humanas e Institucionales. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México. 126 p.
- SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2014) Programa Nacional Forestal 2014-2018. Diario Oficial de la Federación, Cuarta Sección, 28 de abril de 2014. México, D.F. pp:2-80.
- Sessitsch A. and B. Mitter (2015) 21st century agriculture: integration of plant microbiomes for improved crop production and food security. *Microbial Biotechnology* 8:32-33, <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12180>
- Sonnenfeld D. A. (1992) Mexico's "Green Revolution," 1940-1980: towards an environmental history. *Environmental History Review* 16:28-52, <https://doi.org/10.2307/3984948>
- Toledo V. M., P. Alarcón-Chaires, P. Moguel, M. Olivo, A. Cabrera, E. Leyequien y A. Rodríguez-Aldabe (2001) El atlas etnoecológico de México y Centroamérica: fundamentos, métodos y resultados. *Etnoecológica* 6:7-41.
- Troyer A. F. (2009) Development of hybrid corn and the seed corn industry. In: *Handbook of Maize*. J. L. Bennetzen and S. Hake (eds.). Springer. New York, USA. p:87-114, https://doi.org/10.1007/978-0-387-77863-1_5
- Tscharntke T., Y. Clough, T. C. Wanger, L. Jackson, I. Motzke, I. Perfecto, J. Vandermeer and A. Whitbread (2012) Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological Conservation* 151:53-59, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.01.068>
- Turrent-Fernández A. y J. I. Cortés-Flores (2005a) Ciencia y tecnología en la agricultura mexicana: I. Producción y sostenibilidad. *Terra Latinoamericana* 23:265-272.
- Turrent-Fernández A. y J. I. Cortés-Flores (2005b) Ciencia y tecnología en la agricultura mexicana. II. Producción de alimentos. *Terra Latinoamericana* 23:273-281.
- Ullstrup A. J. (1972) The impacts of the southern corn leaf blight epidemics of 1970-1971. *Annual Review of Phytopathology* 10:37-50, <https://doi.org/10.1146/annurev.py.10.090172.000345>
- Unger G. M., G. G. Vendramin and J. J. Robledo-Arnuncio (2014) Estimating exotic gene flow into native pine stands: zygotic vs. gametic components. *Molecular Ecology* 23:5435-5447, <https://doi.org/10.1111/mec.12946>
- Vavilov N. I. (1951) *Estudio Sobre el Origen de las Plantas Cultivadas*. ACME Agency. Buenos Aires, Argentina. 185 p.
- Zhu Q., X. Zheng, J. Luo, B. S. Gaut and S. Ge (2007) Multilocus analysis of nucleotide variation of *Oryza sativa* and its wild relatives: severe bottleneck during domestication of rice. *Molecular Biology and Evolution* 24:875-888, <https://doi.org/10.1093/molbev/msm005>