Ciencia y Fitomejoramiento

PARA UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE

ROLAND VON BOTHMER, OSCAR DÍAZ CARRASCO, TORBJÖRN FAGERSTRÖM, STEFAN JANSSON, FERNANDO ORTEGA-KLOSE, RODOMIRO ORTIZ & MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ

Más allá de los

OGM

Ciencia y Fitomejoramiento

PARA UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE

ROLAND VON BOTHMER, OSCAR DÍAZ CARRASCO, TORBJÖRN FAGERSTRÖM, STEFAN JANSSON, FERNANDO ORTEGA-KLOSE, RODOMIRO ORTIZ & MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ

ISBN: 978-956-404-859-8

Traducido, actualizado y adaptado a lectores de habla hispana a partir del libro: Roland von Bothmer, Torbjörn Fagerström, Stefan Jansson, 2015. Bortom GMO – vetenskap och växtförädling för ett hållbart jordbruk. Fritanke, pp 191.

Traducción del sueco:
Oscar Díaz Carrasco.

Edición:
Oscar Díaz Carrasco.
Fernando Ortega-Klose.

Cita bibliográfica correcta:
Roland von Bothmer, Oscar Díaz Carrasco, Torbjörn Fagerström, Stefan Jansson, Fernando Ortega-Klose, Rodomiro Ortiz & Miguel Ángel Sánchez. 2022. Más allá de los OGM, ciencia y fitomejoramiento para una agricultura sostenible. 204 p.

ISBN: **978-956.404.859-8**

Permitida su reproducción total o parcial citando la fuente y autores.

Las marcas, nombres comerciales y principios activos de productos y empresas mencionadas en este libro, se incluyen para describir temas específicos y no representan recomendación alguna. El contenido del libro es responsabilidad de los autores y no representan necesariamente la opinión de las entidades que apoyaron su publicación.

Diagramación e impresión:
Imprenta América Osorno, Chile

Chile, febrero de 2022.

ÍNDICE

Prólogo de la Real Academia Sueca de Ciencias 5

Prefacio de los autores 7

1. De los agricultores procedemos 13
2. Volveremos a los agricultores 20
3. Fitomejoramiento: pasado, presente y futuro 51
4. ¿Quién es quién en el fitomejoramiento? 85
5. La propiedad intelectual, los derechos de obtentor y las patentes 99
6. Riesgos: ¿reales o potenciales? 112
7. El crecimiento de cultivos transgénicos desde una perspectiva económica, social y política 132
8. Perspectiva internacional 145
9. Recursos fitogenéticos, fitomejoramiento e ingeniería genética para el mejoramiento de los cultivos en América del Sur 158
10. Agricultura, avances y nuevas tecnologías – desafíos del futuro 185

Referencias bibliográficas 198

PRÓLOGO DE LA REAL ACADEMIA SUECA DE CIENCIAS

La fascinante historia detrás de los cultivos que componen nuestros alimentos es desconocida para la mayoría de los consumidores. En las comidas diarias, probablemente pocos piensan en cómo los cultivos de plantas actuales se basan en las leyes y mecanismos de la genética. Probablemente sea esta falta de conocimiento la que ha generado que muchos consumidores sean reticentes a los alimentos que han sido generados sobre la base del conocimiento científico y sobre los mecanismos de la genética.

En particular, algunos consumidores y líderes de opinión parecen estar muy preocupados por el fitomejoramiento moderno y los nuevos métodos genéticos que se utilizan. Esto parece paradójico considerando que el fitomejoramiento tuvo sus orígenes hace más de siglo y medio, y desde ese tiempo se han utilizado diferentes técnicas para la producción de los diversos cultivos de plantas. Dentro de estas metodologías podemos citar, por ejemplo, el uso de las mutaciones, donde se generan muchos cambios genéticos diferentes, con características tanto deseables como indeseables. En este sentido, el fitomejoramiento ha necesitado de muchos años de trabajo e investigación, a través de cruzamientos dirigidos, para poder seleccionar los rasgos deseables y así eliminar los caracteres desfavorables.

Las nuevas técnicas de selección vegetal, a través de metodología modernas de ingeniería genética, por otro parte, son simplemente técnicas innovadoras mejoradas y refinadas de mayor precisión de los métodos de fitomejoramiento existentes, y han sido diseñadas para incrementar la velocidad y eficiencia del fitomejoramiento. Estas metodologías son llamadas nuevas técnicas de mejoramiento de plantas o NBTs (por su nombre en inglés, New Breeding Techniques). Para contribuir a un mayor entendimiento del fitomejoramiento moderno y los beneficios que puede ofrecer, la Real Academia de Ciencias de Suecia convoco el año 2010 a un grupo de expertos en fitomejoramiento con la finalidad de explicar y comparar los diferentes métodos, nuevos y tradicionales, del mejoramiento de vegetales. En un libro publicado en sueco el año 2015, el grupo de expertos describió de una manera pedagógica y sistemática el progreso del fitomejoramiento a lo largo de los siglos hasta los métodos moleculares de precisión actuales.

A pesar de que el fitomejoramiento es un tema conocido en la actualidad, diferentes gobiernos han tenido variadas posturas sobre los Organismos Genéticamente Modificados (OGM) y el uso de las NBTs. Aparentemente, muchos responsables de la toma de decisiones han tenido dificultades para comprender los beneficios de las nuevas metodologías, las cuales presentan un alto grado de exactitud en comparación con métodos tradicionalmente usados. Sin embargo, y afortunadamente, se está produciendo un cambio en la forma de percibir las nuevas técnicas de fitomejoramiento moderno. En el momento de redactar este prólogo, la Comisión Europea ha anunciado que la legislación del año 2001 sobre los OGM no es aplicable a los productos (variedades obtenidas) usando las nuevas tecnologías de mejoramiento de plantas (NBTs), y se debe generar una adaptación a la legislación basada en el progreso científico y tecnológico actual.

Todavía existe una gran necesidad de información entre los tomadores de decisiones y los consumidores con respecto al fitomejoramiento moderno. Básicamente, las preguntas planteadas y las tecnologías son un tema transversal en todo el mundo, incluso si las especies de plantas cultivadas difieren entre regiones geográficas. Por lo tanto, estamos muy contentos de que este libro “Más allá de los OGM” haya sido traducido al español, actualizado y adaptado a lectores de habla hispana. Esperamos que este texto ayude a difundir el conocimiento sobre el fitomejoramiento moderno a todos aquellos lectores interesados de habla hispana.

Nos gustaría agradecer profundamente a los autores del libro, a los traductores y a las organizaciones que han contribuido para hacer posible la distribución de este libro a un público más amplio.

Estocolmo, Suecia, diciembre del 2021

Dan Larhammar
President of the Royal Swedish Academy of Sciences

Göran K. Hansson
Permanent Secretary of the Royal Swedish Academy of Sciences

PREFACIO DE LOS AUTORES

El desarrollo de la agricultura es un desafío mundial para el futuro. ¿Cómo podemos transferir los logros de la investigación a la agricultura actual para que la industria pueda contribuir al desarrollo sostenible del planeta, sin aumentar la carga sobre el medio ambiente?

Algunos creen que la solución está en una transición a métodos agrícolas más extensivos y de baja producción. Nosotros creemos, por otra parte, en el poder de la ciencia y la investigación y que es posible lograr una alta producción combinada con un bajo impacto ambiental. Pero, ¿cuál es la mejor manera de desarrollar las nuevas variedades de plantas que serán necesarias para la agricultura sostenible del futuro; que tengan, por ejemplo: ¿rendimientos altos y uniformes, con tolerancia a la sequía, a la salinidad y a otros factores de estrés, o con resistencia a patógenos?

En este libro, intentamos dar respuestas a estas y otras preguntas relacionadas con la agricultura y la silvicultura del futuro. La biotecnología vegetal y la modificación genética se han cuestionado durante más de tres décadas y siguen siendo objeto de controversia y debate. El Premio Nobel de Química 2020 galardonó el descubrimiento del nuevo método de ingeniería genética CRISPR/Cas9, una tijera genética que permite la llamada edición de genes con mayor precisión que lo obtenido hasta la fecha. Una vez más, la atención se centró en los posibles riesgos y, las normativas legales, lo que demuestra la necesidad de entregar un mayor nivel de información a la sociedad sobre estas materias.

Nuestra ambición es explicar qué es el fitomejoramiento y cómo funciona, qué significa la biotecnología moderna y ponerla en un contexto más amplio. Intentamos, aunque no sea fácil, relevar los problemas relacionados con las patentes y la propiedad de los productos y que gran parte del fitomejoramiento se realiza con financiamiento público o de pequeñas empresas. Otro aspecto importante es quién es el propietario de las variedades generadas, quién tiene acceso a los recursos genéticos y quién debería recibir una compensación por las nuevas variedades.

Nos dirigimos a aquellos que quieren profundizar y formar su propia opinión sobre un tema que ha causado división y despertado muchas emociones en todo el mundo. En el libro,

queremos explicar el tema, más que debatir, desde un punto de vista de la ciencia con respecto al desarrollo de la agricultura y la silvicultura. También queremos destacar el problema de los riesgos y qué argumentos presentados son verdaderos y falsos. Por otra parte, tratamos de mostrar el tema en un contexto social: ¿cómo hemos llegado hasta aquí, por qué ha habido posiciones tan cerradas y existe tanta desconfianza entre los diferentes actores?

La agricultura y la silvicultura son industrias básicas y muy importantes para todos los países de América y, por tanto, fundamentales para la autosuficiencia, la seguridad alimentaria y, no menos importante, para las exportaciones. En este contexto, los temas relacionados con el desarrollo sostenible y el rol del fitomejoramiento son cada vez más esenciales, sobre todo en lo referente a la acción del cambio climático y la necesidad de mejorar continuamente nuestros cultivos. Por ello, uno de los objetivos del libro es poner de manifiesto las diferentes condiciones y posiciones que han adoptado los distintos países de América y relacionarlo con lo que ocurre en el resto del mundo.

Durante la preparación de este libro, varias organizaciones han sido de gran relevancia. El proyecto se inició a solicitud de la Real Academia de Ciencias de Suecia (The Royal Swedish Academy of Sciences (KVA)), con la edición del libro en sueco de los autores Roland von Bothmer, Torbjörn Fagerström y Stefan Jansson. La Real Academia de Ciencias sueca ha apoyado este trabajo desde sus inicios, al igual que la editorial Fri Tanke, que se encargó de su publicación y comercialización en Suecia. Las Fundaciones Wenner-Gren también hicieron una generosa contribución al trabajo. Para la generación y edición del libro en español, Oscar Díaz, Fernando Ortega, Rodomiro Ortiz y Miguel Ángel Sanchez se han encargado de, no solo la traducción de la versión sueca, sino también de la incorporación de extensas adaptaciones y de la inclusión de nuevos capítulos, especialmente adaptados a la realidad americana.

Por último, pero no menos importante, queremos agradecer a The Royal Swedish Academy of Sciences; ChileBIO CropLife (ChileBIO); Asociación Nacional de Productores de Semillas (ANPROS A.G.); la Organización Universitaria Interamericana (OUI-IOHE), la Universidad de Los Lagos y el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA-Chile) por su apoyo en la publicación de este libro. Los autores agradecen, además, a la Sra. Ximena Vera Matus, académica de lenguaje y comunicaciones de la Universidad de Los Lagos, por su tiempo y dedicación en la revisión al español del texto.

Roland von Bothmer
Oscar Díaz Carrasco
Torbjörn Fagerström
Stefan Jansson
Fernando Ortega-Klose
Rodomiro Ortiz
Miguel Ángel Sánchez.

Sobre los autores:

Roland von Bothmer, Ph.D., Profesor Emérito de Genética y Fitomejoramiento, Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad de Ciencias Agrícolas de Suecia (SLU). Es miembro de la Real Academia de Ciencias de Suecia y de la Real Academia Forestal y Agrícola de Suecia.

Oscar Díaz Carrasco, PhD., Profesor Titular en las áreas de Ciencias Biológicas, Genética, Fitomejoramiento y Biotecnología, Departamento de Acuicultura y Recursos Agroalimentarios, Director del Programa FITOGEN (Programa de Conservación, Manejo y Utilización Sustentable de los Recursos Genéticos Vegetales), Universidad de Los Lagos, Osorno, Chile.

Torbjörn Fagerström, Ph.D., Profesor Emérito de Ecología, Universidad de Lund, Suecia, y miembro de la Real Academia de Ciencias de Suecia y de la Real Academia Forestal y Agrícola de Suecia.

Stefan Jansson, PhD., Profesor Titular y jefe del Departamento de Fisiología Vegetal, Universidad de Umeå, Umeå, Suecia, y miembro de la Real Academia de Ciencias de Suecia y de la Real Academia de Ciencias de la Ingeniería en Suecia.

Fernando Ortega-Klose, Ph.D., Ingeniero Agrónomo, investigador en mejoramiento genético de forrajeras del Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile, miembro de la Academia Chilena de Ciencias Agronómicas, Integrante del comité calificador de variedades del Ministerio de Agricultura, Chile, e integrante del comité continuo del International Grassland Congress.

Rodomiro Ortiz, Ph.D., Profesor Titular y Catedrático en Genética y Fitomejoramiento, Departamento de Fitomejoramiento, Universidad de Ciencias Agrícolas de Suecia (SLU), Alnarp, Suecia, y miembro externo de la Real Academia Forestal y Agrícola de Suecia.

Miguel Ángel Sánchez, Ph.D., MA. Biólogo, Director Ejecutivo de ChileBio. Miembro de la Academia Chilena de Ciencias Agronómicas y miembro de la Agrupación por la Biotecnología y la Sostenibilidad Agroalimentaria ABSA Chile.

Esta publicación contó con el apoyo de:

1. DE LOS AGRICULTORES PROCEDEMOS

La mayoría de la población piensa que nos dedicamos a la agricultura para producir alimentos y con seguridad esa seguirá siendo la principal tarea del futuro. No obstante, la agricultura del futuro será capaz de hacer mucho más que en la actualidad, donde con la ayuda del fitomejoramiento podremos producir cultivos que asombrarían a los antiguos agricultores. Por ejemplo, se están generando cultivos que pueden reemplazar al petróleo fósil, que nos proporcionen medicamentos y vitaminas, que pueden crecer en suelos salinos, que disminuyen la fuga de nitrógeno al río o al mar, por citar sólo algunos ejemplos de estos avances científicos.

No es novedad que la agricultura y la silvicultura se han beneficiado del progreso de la ciencia y la tecnología, al igual que otras actividades sustentadas por el conocimiento científico, como, por ejemplo: la industria farmacéutica y las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC). El progreso científico de los últimos 200 años ha incrementado el conocimiento de las funciones vitales de las plantas, de cómo controlar sus enfermedades, el manejo de malezas, de cómo utilizar y renovar el suministro de agua y nutrientes. El desarrollo de la tecnología en todas las etapas, desde el cultivo de las plantas en el campo hasta su consumo en nuestros hogares, es tan importante como en otros sectores de la sociedad. El aumento de la productividad de la agricultura después de la era preindustrial ha sido casi inimaginablemente alto. El crecimiento de la agricultura en América Latina y el Caribe ha sido notable en el contexto global, principalmente como resultado del incrementado de la disponibilidad de proteínas per cápita (29% y 35%, respectivamente, entre los años 1960 y 2009). En la década del 2000, América Latina pasó a ser la mayor exportadora de productos agrícolas. Los aumentos de rendimiento se basaron en el uso de semillas mejoradas, mayor aplicación de fertilizantes y pesticidas, y de óptimas prácticas agrícolas para su intensificación sostenible.

Figura 1.1. *Cambios en distintos sectores productivos (eje vertical) en el siglo XX en Suecia, también observados en otros países miembros de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE).*

Antes de la era industrial, la agricultura recurría a una gran proporción de la población como mano de obra (Figura 1.1). A finales del siglo XIX, en Suecia, el número de personas que se dedicaban a la agricultura era de unos 1,3 millones de habitantes, con una población total de un poco más de 4 millones (más del 30% de la población total). En la década de los años 40, un millón de personas, de una población total de casi 7 millones, se dedicaba a trabajar en la agricultura (aprox. 14%). En la actualidad, la proporción de la población que se dedica a trabajar en la producción agrícola primaria es sólo un muy pequeño porcentaje, como también se observó en otros miembros de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE).

Uno de los requisitos para el surgimiento de la sociedad moderna fue la racionalización de la agricultura, lo que llevó a que la producción de alimentos para la población pudiera ser realizada por un menor número de personas. Sólo así se pudo disminuir la mano de obra rural para utilizarla en los sectores industriales emergentes, en el transporte y en el desarrollo de otras infraestructuras.

El desarrollo de la tecnología ha conducido a una mayor productividad por hora de trabajo, mientras que el desarrollo científico "el aumento de conocimiento sobre la producción agrícola en si misma" ha generado un aumento en la productividad por hectárea. Lo anterior, se puede ilustrar con las cifras impresionantes sobre la necesidad de mano de obra para las cosechas y el procesamiento de los cereales. Se han realizado cálculos de las horas de trabajo utilizadas en diferentes períodos históricos para transferir una tonelada de grano desde las espigas maduras en el campo a una cosechadora hasta que el grano quede listo para ser trasladado al molino.

Figura 1.2. *La cosecha de Pieter Bruegel el Viejo. Fotografía: Wikimedia Commons.*

Figura 1.3. *Trillando el arroz a mano en Sichuan, Guan Xian, China. Fotografía: Roland Von Bothmer.*

Figura 1.4. *Una cosechadora moderna. Fotografía: Wikimedia Commons.*

Durante la agricultura preindustrial se necesitaba unas 250 horas para producir una tonelada de grano, incluyendo las distintas etapas desde la siembra a la cosecha -cuando los cereales eran cortados con guadañas, secados, transportados a la granja, trillados en el granero y ensacados- es decir, más de 6 semanas de trabajo comparado con la actualidad. Hoy en día, la cosechadora procesa una tonelada en menos de cinco minutos.

El valor del desarrollo del conocimiento científico para la producción agrícola también puede ser ilustrado cuando se analiza el área necesaria para alimentar a una persona. En la antigüedad, cuando éramos cazadores, recolectores y campesinos se requerían unas 100 hectáreas para alimentar a una persona, sin embargo, en la agricultura preindustrial se requerían entre 2 y 3 hectáreas por persona. Con la agricultura actual, gracias al fitomejoramiento, se puede alimentar, al menos, a 30 personas por hectárea.

Figura 1.5. *Evolución de los sistemas agropecuarios para la alimentación humana. Fotografía: Urban Emanuelsson, Fotolia.*
Tipo 1. Recolección y caza (1 persona por km^2).
Tipo 2. Agricultura inicial (20 personas por km^2). Pintura de Ero Jernefelt.
Tipo 3. Ganadería y agricultura inicial (50 personas por km^2).
Tipo 4. Cultivo avanzado con fertilizantes (200 personas por km^2).
Tipo 5. Agricultura comercial moderna (3.000 personas por km^2 o 600 animales dependiendo de la proporción de animales por km^2).

La agricultura de hoy se basa en una serie de insumos que provienen de diversas fuentes, por ejemplo, de los combustibles, de los fertilizantes y de los pesticidas. Esta agricultura en ocasiones ha contribuido con efectos ambientales indeseables, como la fuga de nutrientes vegetales a los cursos de agua (ríos, lagos y océanos). Estos y otros efectos no deseados pueden no obstante ser reducidos usando mayor conocimiento y desarrollo tecnológico. El desarrollo de la ciencia y la tecnología permitirán que la agricultura futura sea más sostenible, eficiente y amigable con el ambiente.

En otro ámbito, la revolución de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TICs) ha cambiado radicalmente nuestras vidas. La mayoría de nosotros tiene sólo un conocimiento difuso de cómo funciona la digitalización, es decir, la transformación a información del idioma de los unos y los ceros de las computadoras. El equivalente a la digitalización en biología se llama “molecularización”. En los microorganismos, las plantas, los animales y en nuestras propias moléculas del ácido desoxirribonucleico (ADN) es donde se almacena la información que nos confiere todas las características hereditarias. Estos conocimientos han conducido al desarrollo de una de las aplicaciones más famosas de la biología molecular: la ingeniería genética de las plantas. Pero la ingeniería genética es sólo una aplicación, y relativamente pequeña, en todo el gran campo de conocimiento científico-tecnológico que se proyecta con la “molecularización” de la biología.

Contrariamente a lo que se refleja en la discusión pública, la

biología molecular no es una técnica de manipulación, sino una tecnología de la información. Con un conocimiento cada vez mayor y profundo de los mecanismos moleculares de la vida, la comprensión sobre cómo funciona la vida será cada vez una parte más integrada de la sociedad de la información. Nadie sabe en la actualidad a dónde nos llevará esta revolución del conocimiento, pero tenemos algunas ideas. Hace diez años, uno de los mayores desafíos de la industria informática era tratar de crear una computadora que pudiera ganarle al campeón del mundo en ajedrez. En la actualidad, son los datos generados por la biología molecular y la genómica (es decir, al estudio del genoma completo, de todos los genes de un organismo), uno de los mayores desafíos para medir el desempeño de las computadoras. Las bases de datos de los genes y sus funciones, el patrimonio genético y la variación de las especies están creciendo exponencialmente y están cambiando la forma en que vemos tanto la evolución como la vida misma. Por ejemplo, la especie *Arabidopsis* (planta modelo) y su base de datos TAIR (The Arabidopsis Information Resource), será una pieza clave en el "rompecabezas" para resolver muchos de los grandes retos del futuro: lograr un desarrollo sostenible que beneficie a la gran mayoría del mundo sin sacrificar los limitados recursos del planeta.

Podremos extraer nuevos y valiosos productos tanto de los cultivos como de los bosques, así como materias primas para las industrias petroquímicas y farmacéuticas o la obtención de productos terminados que no necesiten procesamiento industrial. ¿Quién dice que las pastillas para el dolor de cabeza no puedan ser reemplazadas por una baya o una fruta cuyo metabolismo ha sido cambiado para que reciba un contenido muy alto de ácido acetilsalicílico? En el horizonte brillan las posibilidades de un cultivo de plantas basado en sistemas biológicos que puedan ser completamente sintéticos. Tal vez esos sistemas pueden estar contenidos en biorreactores gigantes impulsados por el sol, realizando fotosíntesis artificial en entornos urbanos. Es posible pensar en un retorno mayor para la industria, con una mayor producción de materias primas procedentes de materiales biológicos. Así fue el caso de "La Gran Guerra" (1914–1918), donde el petróleo fósil sustituyó sustancialmente, como materia prima, al material biológico en varios sectores claves de la sociedad; por ejemplo, en la fabricación de los colores o textiles. Las posibilidades que abre la biología sintética son casi ilimitadas.

Para aprovechar las oportunidades que nos ofrece la revolución del conocimiento biológico en la agricultura, se debe, sin embargo, estar familiarizado con la ciencia, en general, y con el fitomejoramiento, en particular. Una pieza importante del rompecabezas, para poder construir una confianza pública en la ciencia, es entender el hecho de que se pueden y deben fijar metas para el fitomejoramiento, usando o no métodos de ingeniería genética. Muy a menudo se censura al fitomejoramiento por una intervención al orden de la naturaleza, de una desviación de lo que inicialmente es natural. Dejando de lado la pregunta filosófica de si lo natural es también automáticamente algo bueno para el ser humano. Lo cierto es que en teoría es posible alcanzar casi cualquier objetivo que el fitomejoramiento se proponga. Si queremos modelar diferentes cualidades de un cultivo para aumentar su productividad es posible hacerlo. Pero también, podemos optar por mejorar algunas características de interés que las variedades antiguas poseían, tal vez a costa de una cierta disminución de la productividad. Si queremos generar cultivos que sean principalmente idóneos para la agricultura a gran escala, lo podríamos hacer. Pero a su vez, podríamos mejorar variedades para ciertos nichos especiales que se ajusten a una agricultura de pequeña escala. Si queremos mejorar la resistencia a enfermedades -de tal modo que la agricultura pueda ser prácticamente independiente del control químico de enfermedades y plagas- lo podríamos también realizar. Las posibilidades están ahí, pero sólo si reconocemos el poder que el fitomejoramiento moderno nos ofrece.

2. VOLVEREMOS A LOS AGRICULTORES

La investigación en las ciencias biológicas será igualmente importante en la sociedad del siglo XXI como lo fue la investigación de la física y la química durante el siglo XX.

Así lo dicen las aseveraciones más audaces de las ciencias biológicas formuladas desde sus propias convicciones. Esto se aplica también a la agricultura, una actividad humana que nos debe entregar alimentos ahora y en el futuro, y que tiene mucho más que ofrecer, para hacer incluso nuestra sociedad más sostenible.

2.1. Retos y oportunidades

Se puede considerar un cultivo vegetal como una fábrica química impulsada por la fotosíntesis que convierte el agua, el dióxido de carbono y los nutrientes en complejos compuestos orgánicos. El desarrollo del conocimiento en biología celular y molecular nos brinda grandes oportunidades para controlar los procesos en esta fábrica y para elegir los productos finales que entregaría.

Investigadores suecos en cultivos de oleaginosas para uso de la industria petroquímica, han señalado que todo lo que puede ser producido a partir de petróleo puede ser también fabricado por un nuevo aceite de origen biológico.

Las oportunidades deben confrontarse con los desafíos que tiene la sociedad. En los últimos años, el debate sobre el cambio climático se ha centrado, a nivel internacional, principalmente en la agricultura y la silvicultura o en el “sector verde”, como se denomina. Se tienen cada vez mayores esperanzas de que los biocombustibles y energías renovables ayuden a reemplazar los combustibles fósiles y a reducir la carga del dióxido de carbono en la atmósfera. Al mismo tiempo, en los próximos 40 años, la creciente población y el aumento del nivel de vida harán que los agricultores y los sistemas alimentarios del mundo produzcan al menos un 60% más de alimentos a precios más accesibles, considerando los actuales patrones de consumo.

Figura 2.1. *El bosque suministra la mayor materia prima biológica disponible. La imagen muestra 1 millón de m³ de madera. Esta cantidad produce el bosque sueco durante una estación por día. Fotografía: Mic Calvert, Oficina de la fortificación.*

La industria forestal del futuro se enfrentará a desafíos similares a los de la agricultura en sus áreas tradicionales de producción y en sus productos, con caídas en los precios reales, con aumentos de las demandas y con una creciente competencia internacional. Sea lo que se cultive en los campos y en los bosques del futuro, existirá siempre la necesidad de utilizar de forma más eficaz y eficiente la capacidad que poseen las plantas para captar la luz solar y convertirla en biomasa útil y que así aumente significativamente. Queremos producir cada vez más alimento para animales, fibras, para el consumo humano, la energía y los bioproductos de los bosques y del campo y, al mismo tiempo, es necesario fortalecer la capacidad de los ecosistemas para producir otros servicios ecosistémicos.

Figura 2.2. *Un ejemplo de un servicio ecosistémico que muchos de nosotros utilizamos.*

Los silvicultores y agricultores de nuestro tiempo se enfrentan a una diversidad de nuevas exigencias y deben satisfacer una amplia gama de necesidades. No sólo aumentar la producción de productos de alta calidad sino también someterse a una fuerte competencia internacional. Los retos de la agricultura actual son el aumento de la producción y, al mismo tiempo, la reducción del impacto ambiental a un nivel sostenible, es decir, poder preservar, restaurar e innovar los valores naturales, así como aceptar los nuevos valores surgidos de la praxis. Todo este proceso debe suceder en diversas áreas de producción de los países de importancia mundial, como los Estados Unidos de Norteamérica, India, China, Rusia, Australia y países de Sudamérica, sin que el área de cultivo que se use en la agricultura aumente de forma significativa y, al mismo tiempo, con un consumo de agua inferior al de la actualidad. Puede parecer una ecuación imposible, pero hay varias soluciones factibles.

Con la ayuda de la tecnología actual, se ha aumentado el rendimiento de los cultivos de manera considerable. Sobre este tema escribió la consejera agrícola del gobierno de Etiopía hace un par de años: “Tenemos la tercera población más grande de África, somos uno de los países más pobres del continente y tenemos uno de los climas más secos. A pesar de esto, tenemos suficientes áreas productivas (principalmente en las tierras altas) para no solamente poder alimentar a nuestra población, sino también para desarrollar una floreciente exportación de productos agrícolas. Lo que se requiere es una reforma agraria integral, capital de inversión y un enfoque sistemático del conocimiento moderno sobre producción racional”. Según la consejera del gobierno de Etiopía, lo que se necesita es una manera diferente de gestionar el manejo del agua, el suministro de los nutrientes en los vegetales y nuevas variedades.

Figura 2.3. *La agricultura etíope adquiere grandes retos. Fotografía: Wikimedia Commons.*

La ciencia y la tecnología proporcionan un número incalculable de oportunidades, incluso para resolver la ecuación antes mencionada. Producto de las empresas de biotecnología y de los institutos de fitomejoramiento financiados con fondos públicos, es posible encontrar muchos ejemplos de cultivos con características que pueden contribuir a una agricultura más sostenible. Los proyectos prioritarios y realizables son el desarrollo

de variedades vegetales que se pueden cultivar en zonas áridas y que pueden crecer en los suelos salinos o con una irrigación de agua salobre, así como cultivos que puedan desarrollarse usando menor cantidad de fertilizantes y plaguicidas, sin disminuir su rendimiento.

El aumento de la resistencia contra enfermedades, una mejor competitividad contra las malezas y una mayor capacidad de utilizar más eficientemente los nutrientes del suelo están también incluidos entre las características de estos nuevos cultivos vegetales que esperan pasar del laboratorio y los invernaderos al campo del agricultor para su producción.

Figura 2.4. *La sequía es el problema principal de las regiones secas y cálidas del mundo, pero también puede afectar a otras latitudes incluyendo a los países nórdicos. Fotografía: Jon Leffmann.*

En el sector forestal también se realiza el fitomejoramiento basado en la biotecnología, lo que puede contribuir a aumentar la sostenibilidad de la producción debido a las nuevas posibilidades que presenta para crear y encontrar variabilidad genética. La biotecnología forestal puede influir y alterar las características que son deseables y mejorar diferentes especies para diversas necesidades. El conocimiento científico actual ofrece oportunidades para adaptar el cultivo de especies forestales a nuevas condiciones estéticas, éticas y ecológicas. El conocimiento de los científicos es muy importante a la hora de adaptar el mejoramiento genético forestal a las diferentes demandas que la sociedad le impone a los bosques y a la silvicultura. Estos requisitos implican, en parte, que ciertas cualidades del bosque se potencien. En el futuro, la denominada "clonación" y la "plantación" deben, en ciertas proporciones, ser diseñadas de acuerdo con otros parámetros que no sólo sean los más económicos sino también deben considerar su sostenibilidad.

Figura 2.5. *Plantación forestal (**Eucalyptus spp.**) en Brasil. Esta plantación produce cerca de 100 m³ por año y hectárea. Fotografía: Wikimedia Commons.*

2.2. Fotosíntesis

La radiación solar global al año es aproximadamente 10.000 veces mayor que la energía total suministrada a todas las sociedades humanas en forma de petróleo, carbón, gas, energía hidroeléctrica, energía nuclear y biocombustibles. Impulsado por la energía solar, la célula vegetal es capaz de combinar el dióxido de carbono del aire y el agua del suelo en las largas cadenas de los ciclos de carbono e hidrógeno. La naturaleza nos ofrece mecanismos sostenibles que con la ayuda del conocimiento de las ciencias biológicas podemos adquirir y utilizar de una

manera favorable. Este conocimiento se puede usar como fuente neutra en carbono para poder contribuir a nuevos sistemas que puedan proporcionar alimentos, materiales y energía de manera sostenible.

En las primeras fases de la fotosíntesis en vegetales, entre 30% y 50% de la luz solar atrapada se transforma en energía químicamente fijada. Es tentador tratar de imitar este alto grado de eficiencia. El desafío científico es grande, pero entre varios consorcios de investigación a nivel mundial, se está intentando que la fotosíntesis artificial libere directamente hidrógeno, como un combustible muy eficiente en energía, que al quemarse vuelve al agua de donde procedía originalmente. La fotosíntesis artificial es un ejemplo de las grandes ganancias sociales que se pueden alcanzar con la ayuda de las ciencias biológicas y la biotecnología para imitar los procesos biológicos propios de la naturaleza. De esta forma, se podría transformar la energía solar en hidrógeno puro y se podría obtener una fuente de energía sostenible que, cuando se utilice, no produciría otros gases de escape sino sólo el vapor del agua.

2.3. Estrés biótico - resistencia a enfermedades y plagas

Enfermedades causadas por virus y bacterias

Las formas más comunes de prevenir la propagación y el daño de los virus en diferentes cultivos son el uso de variedades resistentes al patógeno, el uso de semillas certificadas y libres de virus, el uso de plaguicidas para combatir los insectos que son vectores de virus, el control de las malezas que, además de afectar el crecimiento de la planta huésped, son un huésped alternativo de vectores y virus. Puede ser difícil obtener una resistencia permanente cuando ésta controlada por pocos genes dominantes (resistencia vertical) ya que la resistencia se puede quebrar fácilmente en el caso de que las poblaciones del patógeno muten. Por otro lado, es más difícil obtener una resistencia más duradera cuando varios genes la controlan de forma aditiva (resistencia horizontal).

De manera similar se ha inducido a través de métodos convencionales una resistencia más o menos completa contra varias enfermedades virales en un gran número de cultivos, tales como el tabaco, el melón, la calabaza, el arroz, la papaya, la papa y la remolacha azucarera, entre otras. Aunque esta forma de resistencia a los virus ha sido muy exitosa hasta ahora, también se trabaja con una resistencia condicionada por otras secuencias en el genoma del virus.

Otra forma de lograr protección en contra de las enfermedades virales es previniendo la propagación del virus. A modo de ejemplo, los frijoles pintos brasileños se ven afectados por el virus del mosaico dorado, que se propaga por la mosca blanca, por lo que tradicionalmente se usan insecticidas para prevenir la transmisión de este virus. Por otro lado, a través de técnicas avanzadas de ingeniería genética se han desarrollado frijoles ya disponibles comercialmente, los que impiden la replicación del virus transmitido por la mosca blanca. En otro ámbito, investigadores en Uganda han desarrollado cultivos resistentes a una enfermedad bacteriana que ha destruido los cultivos de plátanos en África del Este. En África, también se han desarrollado variedades de yuca o mandioca con una resistencia mejorada al

Figura 2.6. *Enfermedad bacteriana ("enfermedad del dragón amarillo") que afecta la calidad del fruto en cítricos, es trasmitida por un hemíptero. La obtención de plantas de naranja resistentes al hemíptero evita la enfermedad. Fotografía: USGS Bee Bee Inventory and Monitoring Lab (t.v.), Tim R. Gottwald (t.h.).*

virus del mosaico africano. Estas variedades africanas aún no son comercializadas.

Enfermedades fúngicas

Prácticamente todos los cultivos son atacados por una o más enfermedades fungosas graves. Por lo general, el ataque de los hongos se controla con agentes químicos, llamados fungicidas y su uso se realiza a menudo en forma preventiva, sin que se sepa si el control es necesario, lo cual es costoso y además perjudica el medio ambiente. Al mismo tiempo, es importante combatir las infecciones producidas por los hongos, ya que muchos de ellos producen sustancias tóxicas, como las micotoxinas, que no queremos que estén en nuestros alimentos.

En las especies vegetales de autopolinización (o reproducción autógama), como la cebada, el trigo y la avena, se pueden producir exitosamente variedades resistentes o tolerantes a ciertas enfermedades fungosas usando los métodos convencionales del fitomejoramiento. Por ejemplo, es más fácil obtener variedades resistentes al hongo oidio (*Blumeria graminis*), que al hongo que causa la fusariosis. Sin embargo, el cultivo de una variedad resistente a un hongo determinado puede seleccionar rápidamente razas del patógeno que rompen la resistencia. El intervalo de tiempo de un patógeno para superar la resistencia de una nueva variedad depende, entre otros factores, del mecanismo de la resistencia (vertical u horizontal). A menudo el mejoramiento genético de la resistencia es una carrera entre el fitomejorador y el patógeno.

Cuando una planta resistente de trigo es atacada por, ejemplo, por un hongo biotrofo como el oidio, el ataque causa a menudo una muerte celular local que hace que el hongo no continúe extendiéndose en la planta. Al mismo tiempo, en los tejidos adyacentes se desencadena una síntesis de proteínas antimicrobianas como las quitinasas, las glucanasas y otras proteínas que están relacionadas con los patógenos (proteínas PR). El proceso es característico para la mayoría de los casos donde existe una resistencia a razas específicas de los hongos que son dependientes de los tejidos vegetales vivos, es decir, de organismos biotróficos. Aunque la resistencia específica a la raza de este tipo de hongo es controlada a menudo por un solo gen, sólo a comienzos del siglo XXI fue posible identificar y clonar tales genes. Lo típico de estos genes resistentes es que pueden reconocer al organismo patógeno. Inicialmente los intentos del fitomejoramiento por introducir en las plantas la resistencia a los hongos se realiza utilizando genes que codificaban a las enzimas quitinasas y glucanasas. Sin embargo, sólo se obtiene una resistencia moderada (parcialmente resistente). Al mismo tiempo, en Inglaterra se aislaron y caracterizaron los primeros genes de origen natural que otorgaron una resistencia específica racial del tomate en contra del moho foliar (*Cladosporium fulvum*). Estos genes son complejos y también pueden dar resistencia a otros patógenos distintos al género *Cladosporium*. En la actualidad se investiga cómo los genes pueden reconocer diferentes patógenos y activar diferentes sistemas de defensa, que incluyen las quitinasas, glucanasas y otras proteínas PR.

Figura 2.7. *Tizón tardío (**Phytophthora infestans**) de la papa. Fotografía: Wikimedia Commons.*

Una enfermedad que ha concentrado un interés especial durante mucho tiempo es el tizón tardío (*Phytophthora infestans*) en la papa. El tizón tardío es un pseudo hongo perteneciente al grupo de los oomicetos que ataca primero a las hojas y luego a los tubérculos donde causa un pardeamiento. La mayoría de las variedades de papa utilizadas actualmente por los agricultores son sensibles a este pseudo hongo y deben ser pulverizadas con fungicidas –a menudo 10 o más veces durante el período del cultivo de la papa con la finalidad de controlar este patógeno. Desde hace tiempo se sabe que muchas papas silvestres de los Andes en América del Sur son resistentes al tizón tardío. Los intentos por incorporar resistencia en papas cultivadas al tizón tardío en Europa comenzaron a finales de los años 1950, pero después de varias décadas se logró obtener por fitomejoramiento convencional dos variedades resistentes: "Biónica" y "Toluca". Ambas variedades llevaban un gen de resistencia de la especie silvestre *Solanum bulbocastanum*. Sin embargo, estas variedades resistentes presentan otras características genéticas que han limitado su cultivo. La misma situación ocurre con la variedad "Sarpo Mira", que contiene otro gen de resistencia al tizón tardío. En el año 2006 se realizaron los primeros intentos de incorporar la resistencia al tizón tardío con la variedad "Fortuna", que contiene dos genes de resistencia procedentes de la especie *Solanum bulbocastanum*, y que fueron introducidos a través de la ingeniería genética. Su resistencia podría ser más duradera que la resistencia basada en un solo gen, donde el patógeno podría vencer a la resistencia con mayor facilidad. La comercialización de esta variedad se propuso para el año 2013, pero fue retirada del mercado por la empresa BASF ya que no logró superar las complejas exigencias para su registro en Europa (ver también capítulos 4 y 8).

Una enfermedad fúngica casi ha extinguido el castaño americano (*Castanea dentata*), que en la antigüedad dominaba los bosques del este de los Estados Unidos de Norteamérica. El hongo del tizón produce el ácido oxálico -la sustancia ácida que se encuentra en el ruibarbo- que daña las plantas y que permite la propagación del hongo. Muchas especies vegetales tienen una enzima llamada oxalatoxidasa que descompone el ácido oxálico. Sin embargo, esta enzima en particular se encuentra ausente en el castaño. Mediante la inserción de un gen del trigo, se puede crear castaños que rompen el ácido oxálico y, por lo tanto, se vuelvan resistentes al hongo. Este es uno de los primeros ejemplos, de un árbol genéticamente modificado, que fue plantado bajo regulación en la naturaleza en los Estados Unidos de Norteamérica.

Insectos

Los insecticidas son el grupo más utilizado a nivel mundial de los productos agroquímicos. Aunque el control químico de los insectos ha sido muy exitoso, las pérdidas de producción causadas por los insectos en el campo y durante su almacenamiento representan en promedio algo menos del 15% de la producción agrícola total del mundo. Además, entre los insecticidas hay muchos productos que no sólo son venenosos, sino que también pueden ser mutagénicos, cancerígenos o que pueden causar defectos congénitos (o teratogénicos). Sería un beneficio enorme para la salud y el medio ambiente si estos agroquímicos pudieran ser reemplazados por variedades vegetales con una resistencia eficaz y específica a los insectos que causan esta peste y que no generen efectos adversos para la salud humana, los animales y la naturaleza. La identificación,

Figura 2.8. *Pérdidas (%, eje vertical) provocadas por insectos, enfermedades y malezas en la mayoría de los cultivos a nivel mundial. Fuente: Joachim Schiemann, comunicación personal.*

el aislamiento y la transmisión de genes que proporcionan la resistencia a los insectos ha sido una prioridad en las investigaciones asociadas a la biotecnología vegetal y hasta ahora se ha tenido más éxito que con la resistencia de plantas a las enfermedades fungosas.

Muchas especies vegetales han desarrollado sistemas de protección más o menos eficaces contra los animales que las consumen. En algunos casos, esta protección es mecánica -por ejemplo, por espinas, pelos compactos, semillas duras o cascaras duras- sin embargo, en general, las plantas tienen una protección química, es decir producen sustancias químicas que los animales y/o los insectos no toleran o evitan. Sin embargo, algunos insectos han desarrollado una resistencia a la protección química de algunas plantas, convirtiéndose así en una plaga. Para muchas plantas del repollo, las larvas de varios insectos logran vivir a pesar de que contienen altos niveles de glucosinolatos, que son venenosos para otras especies de insectos. Se conocen muchos genes que controlan la formación de estas sustancias químicas que proporcionan defensa a las plantas que comemos como alimento. Tales genes de resistencia pueden ser combinados y transferidos a otras especies para mejorar los niveles de protección que ya tienen y así entregarles a las variedades una mejor resistencia en contra de los insectos.

Figura 2.9 *Varias especies de insectos son plagas severas del algodón. Aquí se observa la larva de la mosca nocturna Helicoverpa armigera o escarabajo de algodón. Fotografía: David McClenaghan, CSIRO.*

Por ejemplo, los investigadores daneses han demostrado que algunos escarabajos evitan comer las plantas de repollo a las que se han transferido genes de sorgo, gracias a un glucósido que controla el escarabajo.

Hasta ahora, la mayoría de los trabajos de investigación sobre biotecnología vegetal para resistencia a insectos se ha enfocado en *Bacillus thuringiensis* (Bt), que es una bacteria del suelo que produce una proteína cristalina que, cuando se descompone en el tracto digestivo de algunos insectos, forma una sustancia tóxica. El Bt se puede cultivar ampliamente en fermentadores, y se pueden producir grandes cantidades de la proteína a un costo relativamente bajo. Las preparaciones de Bt se han utilizado desde los años 1950 para combatir los insectos, especialmente en la agricultura orgánica, donde su preparación fue aprobada porque ocurría de manera natural y era totalmente inofensivo para los seres humanos. La mayoría de las cepas Bt producen toxinas que son específicas a los insectos del orden Lepidoptera (comúnmente conocidos como mariposas y polillas) o para los del orden Coleoptera (conocidos como escarabajos). Por lo tanto, son eficaces contra organismos nocivos como lepidópteros del maíz, o los escarabajos de la papa y el algodón. Otras cepas producen toxinas específicas para el orden Diptera que incluye a las moscas y los mosquitos.

Figura 2.10. *Las preparaciones de Bt también se utilizan para el control de los insectos a gran escala –en la fotografía para el control de los mosquitos en el área de Dalälv. Fotografía: Sven-Olof Ahlgren / UNT / SCANPIX.*

Los genes que codifican para una serie de proteínas específicas de Bt han sido clonados e introducidos, por ejemplo, en el tabaco, en el algodón, en el maíz y las papas. Desde el año 1996 existe el maíz con resistencia al Bt en contra del taladro del maíz (*Ostrinia nubilalis*) y desde el año 2003 se introdujeron variedades con resistencia al gusano del maíz (*Diabrotica virgifera virgifera*). El maíz Bt se cultivó en el año 2018 en aproximadamente 59 millones de hectáreas en todo el mundo (31% del global cultivado). También se ha cultivado extensivamente el algodón Bt con resistencia, por ejemplo, al gorgojo o picudo de algodón (*Anthonomus grandis*). El área global sembrada con algodón Bt en el año 2018 fue cerca de 25 millones de hectáreas (76% del global cultivado), encontrándose la mayoría en China, India y Pakistán.

Otra forma de lograr la resistencia a los insectos es por ingeniería genética introduciendo genes que controlan la producción de proteínas vegetales específicas que interfieren con la digestión de los insectos. Un ejemplo es la Cowpea Tripsin Inhibitor (CpTI) que da resistencia a insectos chupadores como los áfidos. Esta resistencia se transfirió desde *Vigna unguiculata* a *Galanthus nivalis*, evento que aún no es comercial.

Figura 2.11. *El frijol Castilla o caupí (**Vigna unguiculata**) contiene naturalmente una proteína que interfiere con la digestión de los insectos. Fotografía: Wikipedia Commons.*

Las plantas que producen sus propios "insecticidas" son las que contribuyen significativamente al crecimiento de la agricultura. También benefician el medio ambiente ya que tienen la ventaja de reducir o evitar el uso de pesticidas. Asimismo, las tecnologías OGM y NBTs en plantas pueden mejorar el entorno del trabajo de los campesinos vulnerables, los que habitualmente trabajan sin ninguna protección cuando aplican insecticidas peligrosos que pueden dañar su salud. Existe, no obstante, el riesgo de que una presión de selección continua haga que el insecto se adapte genéticamente al factor de resistencia y la variedad se vuelva susceptible. Por lo tanto, el desarrollo de nuevas variedades con nuevas resistencias debe ser un proceso continuo.

Malezas y resistencia a los herbicidas

Durante la década de los años 50, se desarrollaron los primeros herbicidas químicos selectivos que eliminaban las malezas sin dañar el cultivo. Sin embargo, es difícil desarrollar herbicidas selectivos para una variedad de cultivos debido a que muchas plantas cultivadas están relativamente cerca de sus parientes silvestres, que a veces son malezas. Otros herbicidas no selectivos o de amplio espectro usualmente se usan sólo después de la cosecha o antes de la siembra. Los genes que toleran un herbicida pueden seleccionarse y aumentar su frecuencia en las malezas si se utiliza un solo herbicida en el mismo lugar durante mucho tiempo, generando resistencia a herbicidas en malezas. Tales genes también pueden introducirse en un cultivo para darle tolerancia al herbicida.

La mayoría de los herbicidas modernos de amplio espectro, presentes en el mercado inhiben una enzima que controla la síntesis de aminoácidos de las plantas; estos afectan el medio ambiente en un grado significativamente menor que la mayoría de los herbicidas más antiguos. Los cultivos tolerantes a herbicidas también han permitido sistemas de agricultura conservacionista en áreas donde la erosión del suelo es un problema. Se establece un nuevo cultivo sobre los residuos de la cosecha del año anterior, sin labranza o con labranza mínima, y se eliminan las malezas perennes y anuales, usualmente con

un sólo tratamiento de un herbicida de amplio espectro después de la emergencia del cultivo. Existe más de media docena de herbicidas de amplio espectro para los que se han introducido genes de tolerancia en las plantas por métodos OGM y por métodos modernos no OGM; entre los primeros, los más comunes aquellos con sustancias activas como el Glifosato, el Glufosinato, y entre los segundos, la resistencia a las Imidazolinonas. En el año 2019, los cultivos tolerantes a herbicidas GMO se sembraron en alrededor de 81 millones de hectáreas en todo el mundo.

2.4. Una agricultura productiva y eco-eficiente

Desde sus orígenes, la agricultura aprovechó la riqueza fósil de millones de nutrientes orgánicos y sales de rocas erosionadas almacenados en el suelo. En los suelos provenientes de los bosques se agotaban rápidamente estos nutrientes y los agricultores se veían obligados a buscar nuevos sitios de cultivo. En los valles, la tierra es más profunda, los minerales más ricos y el período para la agricultura más largo. Por otro lado, la pradera se beneficia con las devoluciones de los nutrientes de los animales a pastoreo o del estiércol almacenado en los establos que se utiliza como abono.

Figura 2.12. *Preparación de suelo agrícola a partir de bosque usando "cortar y quemar" en medio de Suecia en 1911. Fotografía: Nils Keyland, Museo Nórdico.*

Figura 2.13. *Pradera establecida en suelo de bosque. Alvena lindaräng en Gotland Fotografía: Archivo Emanuelsson urbano.*

Con la introducción del abono como fertilizante, los problemas de falta de nutrientes del suelo se resolvieron, pero sólo por un período limitado de tiempo. Los minerales que utilizamos para fertilizar el suelo se obtienen de fuentes limitadas. En muchas partes del mundo, el agua también se convierte en un recurso limitante.

Figura 2.14. *Arar ha sido uno de los símbolos de modernización de la agricultura, aunque todavía plantea problemas ambientales importantes. Fotografía: Archivo E.O. Hoppe / Corbis.*

La agricultura moderna se basa en el laboreo del suelo. En esta operación y la del uso posterior de la cosechadora, se consumen aproximadamente el 30% de toda la energía fósil utilizada en la agricultura, que es un poco más de lo utilizado para la producción de fertilizantes sintéticos.

También el uso del arado está asociado al drama que rodea la fuga de nutrientes de la tierra cultivable. En una tierra agrícola fértil, aproximadamente 7,000 kilogramos de nitrógeno por hectárea están unidos a las raíces y restos de cosecha. Tan pronto como se sumerge el arado en el suelo, comienza una descomposición rápida de compuestos orgánicos, lo que da lugar a la liberación de nitrógeno en la atmósfera y su filtración al agua de drenaje. El contenido de carbono del suelo disminuye casi en 1% al año en los campos de cultivos o en los bosques. Por el contrario, el contenido de carbono del suelo aumenta cuando se mantienen pastizales permanentes.

Figura 2.15. *Cambios a largo plazo del contenido de carbono del suelo. Fuente: Rothamsted Research, Reino Unido.*

Es obvio pensar que un sistema de cultivo, donde el uso de la tierra y de sus suelos, es reducido, o incluso disminuido radicalmente, conlleva a grandes beneficios desde el punto de vista de una agricultura sostenible. El fitomejoramiento moderno considera este aspecto como un objetivo primordial.

El arado versus la agricultura de conservación por siembra directa

El rol del arado del suelo -además de prepararlo para la siembra- es combatir las malezas. La agricultura de conservación con la siembra directa y labranza mínima (o sin labranza) se beneficia de variedades tolerantes a herbicidas, lo que conlleva a múltiples ventajas: la reducción de la erosión del suelo, la disminución del consumo de combustible para la maquinaria utilizada en el arado, la reducción de la fuga de nutrientes, la disminución de la compactación del suelo, la reducción del uso de fertilizantes, la mejor utilización del agua y el aumento de la biodiversidad.

Durante la última década, la agricultura de conservación ha aumentado dramáticamente. En los Estados Unidos de Norteamérica, casi el 40% de su agricultura se realiza sin arar. El consumo de fertilizantes nitrogenados se ha reducido en un 10% en los últimos diez años, mientras que los rendimientos han aumentado. Los cultivos mejorados por la biotecnología moderna, la reducción del arado del suelo, la agricultura de precisión mediante sistemas de georeferencia para el posicionamiento global (GPS) y la fertilización hecha a la medida para cada cultivo son de utilidad para lograr una agricultura más sostenible.

Cultivos anuales versus perennes

La razón por la que basamos nuestra producción de alimentos en cultivos anuales es, en gran medida, histórica. Cuando nuestros antepasados se convirtieron en agricultores hace 10.000 años eran simplemente los cultivos de un año los que eran más fáciles de domesticar y sus semillas eran las más nutritivas. Las plantas perennes destinan menos energía en producir semillas, con el objetivo de ahorrar energía para mantener su perennidad. Con los métodos moleculares actuales es muy posible crear variedades de semillas oleaginosas, o de otras especies, que, como el trigo, se pueden sembrar a principios de otoño y cosechar en el otoño posterior.

Figura 2.16. *Poa anual (**Poa annua**) y pasto azul de Kentucky (**P. pratensis**) son dos especies herbáceas emparentadas de la región euroasiática. El primero es anual y el último perenne. Incluso los parientes cercanos pueden diferir con respecto a este aspecto del ciclo de vida.*

En el American Land Institute de Kansas se está trabajando para transformar muchos de los grandes cultivos herbáceos anuales, como el maíz, el trigo, el sorgo y el girasol en plantas perennes. Los cultivos experimentales incluyen un trigo perenne con una cosecha de granos equivalente al 70% de la cosecha del trigo convencional. Económicamente, el 70% puede ser un nivel de cosecha rentable, dado que el agricultor ahorra una gran parte del costo de los insumos. Sin embargo, no se debe perder de vista las necesidades crecientes de alimentación de la población mundial.

Figura 2.17. *Sorgo (**Sorghum bicolor**) es uno de los cultivos anuales con los que se trabaja para desarrollar una variante perenne. Fotografía: Wikimedia Commons.*

Los sistemas de cultivo basados en plantas leguminosas perennes tienen la ventaja comparativa que pueden desarrollar en el campo una interacción a largo plazo entre plantas y microorganismos. Estas especies captan nitrógeno y carbono del aire y lo convierten en más proteínas y carbohidratos en el heno cosechado de los cultivos de grano anuales, a pesar de que se añade fertilizante en los últimos. Esto se debe a las bacterias fijadoras de nitrógeno que viven en las raíces de las leguminosas, obteniendo el nitrógeno del aire, luego se descomponen, el nitrógeno se libera y lo absorben las raíces de las plantas.

Por otro lado, en los cultivos que tienen raíces profundas, los nutrientes están siempre disponibles, pero en aquellos que presentan raíces más superficiales hay menos acceso a los nutrientes.

Figura 2.18. *Masa radical en diferentes épocas del año para una gramínea anual invernal (izquierda en cada estación) en comparación con el trigo perenne* ***Thinopyrum intermediumque*** *(derecha en cada estación). Fuente: Glover et al. Science Vol. 328, 25 de junio del año 2010, p. 1638].*

Un trigo invernal sembrado en otoño causa una fuga de nitrógeno de aproximadamente 20 kilogramos por hectárea en un suelo de arcilla usando la dosis normal de fertilización con abonos sintéticos. Se estima que la transición de un cultivo anual a uno perenne reduciría esta fuga de nitrógeno en un 60%. Ninguna otra medida individual se acerca a este nivel para reducir el uso del nitrógeno en la agricultura. Además, los cultivos perennes pueden retener más carbono que los cultivos anuales. De acuerdo con los resultados obtenidos en Inglaterra, se puede estimar que un cultivo perenne retiene 1 tonelada de dióxido de carbono por hectárea al año.

Por último, una transición a cultivos perennes –que significa que no se tiene que arar– implica una menor conducción de tractores y, por lo tanto, reduce el consumo de energía y reduce la compactación del suelo. Además, se pueden añadir una serie de efectos positivos que son más difíciles de cuantificar, como la reducción en el uso del fósforo, o la emisión del amoníaco, óxido nitroso y el impacto en la fauna y la flora en los agro-ecosistemas.

2.5. Nutrición y tolerancia al estrés

A menudo se argumenta que el uso de la ingeniería genética en las plantas sólo ha significado hasta ahora mejoras que benefician a las grandes industrias vinculadas al fitomejoramiento. Se obtendría una mejor aceptación de la tecnología si las propiedades modificadas fueran de interés directo para el consumidor y la sociedad. Un ejemplo de tal aplicación es el “arroz dorado”, que es un arroz con la capacidad de sintetizar β-caroteno (provitamina A). La idea es hacer al “arroz dorado” una fuente de vitamina A, que pueda remediar la falta de esta vitamina que conduce a la ceguera de muchos niños en países donde el arroz es el alimento básico. A pesar de que han pasado más de 15 años desde que el primer “arroz dorado” estuvo listo para su introducción y, posteriormente, se han desarrollado nuevas variantes con 10 veces más alto contenido de β-caroteno, ha sido muy difícil obtener la aceptación de los gobiernos y del público; recién en el año 2021 Filipinas se convirtió en el primer país en autorizar su siembra comercial.

Figura 2.19. *El arroz dorado tiene su nombre porque es amarillo al ser enriquecido con β-caroteno, una sustancia que se convierte en vitamina A en nuestro cuerpo. Fotografía: Wikipedia Commons.*

Muchos otros proyectos están en curso; también, tienen como objetivo aumentar el valor nutricional de los diferentes cultivos. Por ejemplo, se encuentran las batatas (boniatos o camotes) con un mayor contenido de β-caroteno, "maíz multivitamínico", zanahorias con contenido de calcio duplicado, tomates con un 20% más de antioxidantes y mayores niveles de hierro, proteínas y vitaminas. Desde el año 2005, se ha estado desarrollando un proyecto global dirigido a crear variedades de yuca con mayores niveles de vitaminas y minerales, así como resistencia a enfermedades importantes.

Los cultivos pueden perder de forma natural hasta un 60 o 65% del rendimiento debido a diversos factores de estrés abiótico, tales como, insuficiente intensidad luminosa, temperatura demasiado alta o baja, suministro insuficiente de agua, pH inadecuado, salinidad o suministro nutricional insuficiente del suelo. Los resultados de los estudios de ocho de los principales cultivos herbáceos en los Estados Unidos de Norteamérica muestran que es posible aumentar el rendimiento de manera significativa incrementando la tolerancia de las plantas a uno o más de estos factores de estrés.

En muchas zonas de cultivo importantes del mundo, la disponibilidad de agua ha disminuido considerablemente, lo que requiere una mejor gestión de los recursos hídricos y del desarrollo de variedades con una mejor tolerancia a la sequía o con una mayor capacidad de absorción de agua. Por ejemplo, muchas variedades de maíz tolerantes a la sequía se han desarrollado con tecnología del fitomejoramiento convencional, especialmente en África. Sin embargo, se requieren mayores esfuerzos cuando la FAO estima que aproximadamente 480 millones de africanos en el año 2050 vivirán en las zonas con mayor escasez de agua. Recientemente, una empresa multinacional de semillas ha introducido variedades modificadas genéticamente de maíz tolerantes al estrés hídrico.

La soya, el algodón, el arroz, la caña de azúcar y el trigo son otros cultivos donde se producen variedades que pueden ser cultivadas con menor cantidad de agua. Del mismo modo, también se han desarrollado plantas que absorben los nutrientes de manera más eficiente y, por lo tanto, requieren de menos fertilizante. Al respecto, los científicos suecos han desarrollado plantas que pueden absorber mejor el nitrógeno del fertilizante orgánico en comparación con las malezas, lo que permite la "fertilización selectiva", es decir, usar el estiércol de establo; lo cual, es una ventaja significativa para los agricultores que, por diversas razones, no utilizan fertilizantes sintéticos como los productores orgánicos. Además, diversas variedades de plantas generadas con las nuevas técnicas de fitomejoramiento (NBTs) pueden tolerar temperaturas más altas, o más bajas, que las producidas de forma convencional o bien pueden crecer en suelos con altos niveles de salinidad.

2.6. Nuevos productos de la "planta química"

La fotosíntesis es el punto de partida y la piedra de sustento para el crecimiento de las plantas. Cuanto mejor sea el conocimiento que se puede obtener sobre la célula y la planta, mejores serán las condiciones para poder influir y utilizar todos los productos y las propiedades que se pueden generar.

Nuestro conocimiento sobre la transformación de las plantas con genes nuevos o modificados, o con el silenciamiento de genes, hace posible cambiar o interrumpir el curso normal de los procesos metabólicos en las plantas. Esto genera la oportunidad de desarrollar nuevas variedades que puedan proporcionar productos completamente innovadores, como nuevos tipos y grados de carbohidratos, aceites y proteínas, adaptados a los requerimientos de la industria alimentaria y a otros usos industriales. Hasta ahora, los resultados más tangibles se han obtenido en el caso del almidón, los aceites vegetales y las grasas.

El metano es el hidrocarburo más simple que se forma descomponiendo las cadenas de hidrocarburos más complejas en moléculas más pequeñas. Por el contrario, la planta construye todas sus diversas moléculas orgánicas –azúcar, almidón, celulosa, aceites, grasas y ceras– combinando hidrocarburos sencillos en cadenas más largas y complejas. Ya sea que utilicemos

cualquiera de estas cadenas para la producción de energía o cualquiera de los materiales que actualmente obtenemos de la industria petroquímica, existen conocimientos básicos que son comunes, así como también existen necesidades y oportunidades para futuras investigaciones.

En el sector agrícola

Los aceites, ceras y grasas que se forman en las plantas tienen un gran potencial para reemplazar lo que en la actualidad obtenemos del petróleo y del carbón. De todo el petróleo fósil que extraemos del interior de la tierra, alrededor del 10% de los productos son para la industria química –como, por ejemplo, los plásticos, las pinturas, el caucho sintético, las resinas, los aceites, las lacas, los aisladores y las fibras sintéticas. Estos productos pueden ser sustituidos por el aceite producido por las plantas; si aprendemos los mecanismos moleculares que controlan las vías y rutas metabólicas y bioquímicas de las plantas y cómo las diferentes condiciones de cultivo afectan a estas vías.

Figura 2.20. *En el futuro será posible producir aceite a partir de cultivos de almidón, o ricos en azúcares, tales como el trigo, el maíz y la remolacha azucarera.*

Los investigadores estudian distintas especies vegetales que contienen ésteres de aceites. Estos son interesantes como materias primas para generar aceites altamente calificados y como reemplazo de varios aceites sintéticos de motores de los vehículos. Se trata principalmente de dos especies de plantas: *Crambe abyssinica* y *Lepidium campestre*. Un ejemplo, es la variante Crambe que se ha mejorado para producir un aceite de calidad comparable al aceite que se produce para obtener lubricantes.

Figura 2.21. ***Lepidium campestre*** *y* ***Crambe abyssinica****: dos nuevos cultivos oleaginosos. Fotografía: Wikimedia Commons.*

El almidón consiste en dos tipos de cadenas de moléculas de glucosa: amilosa y amilopectina. Pequeñas diferencias en las proporciones entre la amilosa y la amilopectina afectan la forma de los gránulos de almidón, la solubilidad y su idoneidad para los procesos industriales. El almidón con mucha amilopectina es exigido por la industria del papel, mientras que la fabricación de bioplástico requiere altos niveles de amilosa. Con la ayuda de la ingeniería genética, a principios de los años 90, los investigadores desarrollaron una papa que contenía almidón amilopéctico. Una primera solicitud de aprobación para el cultivo comercial fue presentada en el año 1996, pero la licencia se aprobó en el año 2010, ya que BASF Plant Science asumió la responsabilidad del desarrollo comercial del producto. En el año 2012, BASF Plant Science abandonó el mercado europeo. La variedad “Amflora”, es un ejemplo de una papa desarrollada por la ingeniería genética y que tiene una composición de almidón que se ajusta a las necesidades de la industria del papel.

En el sector forestal

Antes de la industria del petróleo fósil, la industria química dependía exclusivamente de lo que se podía obtener de los

bosques y del suelo. La seda de rayón, el celuloide, la baquelita o la trementina son los productos manufacturados por la industria química de materias primas biológicas. La baquelita –o Isolite que la empresa se adjudicó como su producto para hacer frente a una disputa internacional de patentes– se realizó en el sur de Suecia a partir de productos de los arbustos de los bosques y se convirtió en la puerta de entrada de la compañía a la era del plástico. El fin del petróleo fósil barato marcó este periodo en la historia de la industria química y, por lo tanto, también de la investigación sobre cómo las materias primas biológicas podían ser utilizadas. Al aumentar el precio del petróleo, el interés aumentó y estamos actualmente invirtiendo nuevamente en la investigación sobre las materias primas verdes. Dado el gran rol que desempeñan la industria maderera y la industria de la pulpa en la economía sueca, es posible utilizar la molécula de celulosa y las fibras de madera para otros propósitos y dar a las fibras madereras nuevas características a las de uso corriente. La industria global de la tecnología petroquímica obtuvo originalmente sus materias primas exclusivamente de la madera.

Las propiedades de la molécula celulósica son controladas por los genes en interacción con el medio ambiente y afectan la forma en que la madera útil se vuelve pulpa de papel, o celulosa versátil y útil. Con la ayuda de nuevos procesos biotecnológicos

Figura 2.22. *Nuevos productos que pueden ser hechos de madera. Fotografía: Wikipedia Commons.*

se puede producir el material biodegradable de la fibra celulósica que puede utilizarse en el empaquetado de los alimentos o en otros materiales muy resistentes para la industria automotriz. La investigación sueca es prominente en estas áreas.

Los bosques naturales han sido cosechados y reemplazados por bosques plantados, que son manejados por métodos especiales. Una gran diferencia entre la silvicultura y la producción agrícola es que los bosques tienen un lapso intergeneracional muy largo (20 a 30 años). Sin embargo, la silvicultura tiene el mismo potencial genético para el mejoramiento en comparación a los cultivos agrícolas. Los investigadores suecos han demostrado que hay posibilidades de acortar significativamente el tiempo requerido para alcanzar la madurez reproductiva, lo que ofrece nuevas posibilidades para el mejoramiento forestal.

Muchas características de las plantas son posibles de modificar a través de la hibridación y la selección. Esto se aplica, por ejemplo, a características tales como longitud y calidad de fibra, o distribución, composición y construcción de lignina y celulosa. Todas estas características son importantes para la industria papelera y la de la pulpa de papel, así como para utilizar las materias primas forestales como punto de partida para los biocombustibles de segunda generación. Fuerza, resistencia al impacto y elasticidad son propiedades de gran importancia para la industria de la construcción. La presencia de aceites, resinas, terpenos y muchas otras sustancias interesantes que pueden ser utilizadas por la industria de la ingeniería química pueden ser modificadas en diferentes partes del árbol mediante la biotecnología moderna.

2.7. El dilema de la agricultura y la silvicultura del futuro

La investigación realizada en los laboratorios de física y química fue muy importante para impulsar la transformación de los países en desarrollo en sociedades industriales, como los del norte de Europa. Las ciencias biológicas proveen grandes oportunidades para las futuras transformaciones sociales. Si

queremos aprovechar las oportunidades que la revolución del conocimiento biológico tiene en mente, debemos, no obstante, ser mejores en la realización de un debate serio sobre los temas científicos futuros. El desarrollo de los conocimientos biológicos ganará aceptación pública a medida que sus aplicaciones puedan ser utilizadas. La cuestión de cómo lograr tal aceptación es uno de los mayores retos políticos y científicos de la época. En Europa, existen grandes problemas para gestionar el potencial del fitomejoramiento moderno. Sin embargo, el optimismo prospera en otras partes del mundo. Esto es lo que el expresidente estadounidense Barack Obama dijo en Washington el 20 enero del año 2009: *"No vamos a disculparnos por el estilo de vida estadounidense, pero cada día damos nuevas pruebas de que el uso de la energía estadounidense fortalece a nuestros enemigos y amenaza nuestro planeta. Desde el dilema –de defender un estilo de vida que amenaza la seguridad del país y la supervivencia del planeta– probablemente sólo haya una salida [...] Nuestra hoja de ruta es que vamos a utilizar al sol, al viento y a la tierra para obtener el combustible que impulsa nuestros automóviles y nuestras fábricas. Va a suceder devolviendo a la ciencia a su legítimo lugar y cosechando tecnología".*

3. FITOMEJORAMIENTO - PASADO, PRESENTE Y FUTURO

3.1. Fitomejoramiento 0.0 De las especies silvestres a las plantas cultivadas

La domesticación y adaptación – los primeros pasos

La agricultura comenzó cuando las personas –en lugar de comer sólo los alimentos obtenidos a través de la caza, la pesca y la colecta de las raíces, las semillas y las frutas de las plantas silvestres– comenzaron a cultivar plantas y criar animales domésticos. Esto ocurrió hace unos 10.000 años y casi simultáneamente en varias regiones geográficas templadas y subtropicales del mundo. La agricultura se convirtió así en la base para el desarrollo de la civilización actual con la aparición de poblaciones sedentarias. Primero ocurrió en la Mesopotania (entre los ríos Eufrates y Tigris) del sudoeste asiático (o las áreas no desérticas del actual Irak y la zona limítrofe del noreste de Siria) donde se domesticaron varios de los cultivos templados como el trigo, la cebada, el lino, las lentejas y los guisantes. Otros orígenes importantes de la agricultura es Mesoamérica con el maíz, Sudamérica con la papa, Asia Oriental con el arroz y África

Figura 3.1. *Centros de origen de los principales cereales, indicando los años aproximados desde su domesticación (entre paréntesis).*

con el sorgo y el mijo. En estos cuatro centros de origen, las especies silvestres fueron las más importantes constituyendo la base de la primera agricultura a base de cereales.

El primer cambio importante fue la domesticación; es decir, las especies silvestres fueron modificadas genéticamente para adaptarse al hombre y sus requerimientos de cultivo. La domesticación significó un cambio radical en las plantas: de estar adaptadas óptimamente a sus biotopos naturales, las plantas fueron seleccionadas para ser parte en un sistema agrícola desarrollado por y para los seres humanos. Sus patrones de vida básicos fueron modificados. Al domesticarlas, ya no eran necesarios ciertos mecanismos efectivos de dispersión de semillas por animales, el viento o de semillas que maduraban en diferentes tiempos. Las semillas de las plantas domesticadas maduraban simultáneamente para ser cosechadas; no se propagaban, ni por los animales ni por el viento. Otros cambios que ocurrieron fueron la transición de la polinización cruzada a la auto-fertilización, junto con la pérdida de la dormancia para que todas las semillas germinen simultáneamente.

A: Cebada silvestre **B: Variedad local** **C: Variedad moderna**

Figura 3.2. *El desarrollo de la cebada, de una forma silvestre a una cultivada. A: La forma silvestre* ***Hordeum vulgare*** *subsp.* ***spontaneum****, que sigue creciendo en las zonas montañosas del suroeste de Asia. B: Variedad nacional de cebada del Tíbet de seis granos. C: Granos modernos de cebada de seis granos. Foto: Takao Komatsuda y Roland von Bothmer.*

Un aspecto común de las primeras características que se modificaron por el proceso de domesticación es que estaban controladas por uno o pocos genes de alto impacto para la planta (macroevolución). Los primeros agricultores no eran plenamente conscientes de lo anterior, pero eligieron plantas donde las semillas maduraban casi simultáneamente y no se dispersaba. La selección natural de poblaciones genéticamente muy variables, combinada con la selección dirigida de los cultivadores, fue el inicio del desarrollo de las plantas cultivadas y del fitomejoramiento que posteriormente permitió el surgimiento de la agricultura moderna. Probablemente, la selección consciente inicial implicó que el agricultor escogiera plantas sanas con semillas bien desarrolladas y que no se dispersaban durante la maduración. Eventualmente, las propiedades agronómicas como la altura y el rendimiento de las plantas también se convirtieron en criterios de selección importantes.

Figura 3.3. *Diferenciación de la multiforme col cultivada. La col fue domesticada durante los tiempos de los griegos y los romanos varios siglos antes de Cristo en la actual Grecia y el sur de Italia. Sucesivamente, se desarrollaron los diferentes tipos de col como (de izquierda a derecha): el repollo, la col de Bruselas, el colinabo, la col rizada, el brócoli y la coliflor.*

La agricultura se expande – adaptación a nuevos ambientes

La mayoría de nuestros cultivos actuales fueron domesticados hace aproximadamente 7.000 años. El hecho de que los primeros agricultores tuvieran un conocimiento significativo de los requerimientos de cultivo, la polinización y el

procesamiento de las semillas se muestran en sus artefactos e imágenes contemporáneas. Desde la primera domesticación –en la Mesopotamia– se extendió rápidamente el concepto de agricultura a otras zonas del planeta. Se generaron nuevos cultivos herbáceos, debido a su variabilidad, adaptándose a nuevas condiciones, recombinando genes heredables y acumulando cambios genéticos (mutaciones). Esto condujo a nuevos tipos de plantas que podían ser adaptadas por selección natural o por selección humana a las condiciones locales, debido a la rápida migración de la población humana y a las semillas que los primeros agricultores trasladaron consigo a distintos lugares del mundo.

Figura 3.4. *Variedades locales antiguas de trigo y cebada, adaptadas a condiciones climáticas extremas en las alturas de la meseta del Tíbet. Fotografía: Roland von Bothmer.*

La agricultura en el norte y oeste de Europa se inició hace aproximadamente 6.000 años. Primero se cultivaron los cereales (como el trigo y la cebada) y éstos se han cultivado continuamente desde entonces. Esto significa unas 6.000 generaciones (una cosecha por año) con la posibilidad de que ocurrieran nuevas recombinaciones genéticas anualmente, lo que sugiere que el fitomejoramiento primitivo adaptó los primeros cultivos a las condiciones especiales de su agricultura primigenia y que, posteriormente, fueron absolutamente cruciales para el desarrollo de la población en cada país. Por ejemplo, si no se hubiesen seleccionado variedades de cereales para el clima del norte de Europa, los primeros agricultores no hubiesen podido colonizar grandes partes de esta parte del planeta. También, repatriar allí a las otras poblaciones migrantes que vivían en las cavernas y se alimentaban de la caza, la pesca y la recolección.

A través de milenios, este trabajo de selección humana, combinado con cruzamientos espontáneos y otros cambios genéticos, han dado origen a cultivos con mayores rendimientos y mejor adaptación a diferentes condiciones climáticas. Con el tiempo surgieron variedades de poblaciones adaptadas localmente para todas las plantas cultivadas. La diversidad genética dentro y entre especies fue el material de origen de la producción organizada de semillas y el fitomejoramiento, que comenzó a crecer a mediados del siglo XIX en Europa. Las variedades usadas en la agricultura del siglo XIX, o principios del siglo XX, en gran parte, han desaparecido (algunas se conservan en la actualidad en diversos bancos de germoplasma) pero parte de sus genes permanece en las variedades modernas de la agricultura actual.

Figura 3.5. *Las variedades antiguas locales muestran una gran diversidad genética. Trigo de Nepal (izquierda) y cebada de Sichuan, China (derecha). Fotografía: Roland von Bothmer.*

Genética – La base científica del fitomejoramiento

En el año 1866, el monje Gregor Mendel, de la ciudad de Brünn (ahora Brno en la República Checa), publicó sus resultados

pioneros que demostraron la existencia de factores hereditarios estables que se pueden combinar en la descendencia.

Con el redescubrimiento de las leyes de Mendel, alrededor de 1900, se generaron importantes aplicaciones para el fitomejoramiento. En el año 1902, se introdujeron los términos homocigótico y heterocigoto y luego el término genética, como el nombre de la nueva ciencia que estudia la herencia de los genes de generación en generación. Normalmente, las plantas y los animales heredan sus genes de ambos progenitores, resultando en un grupo doble de cada gen. Por lo tanto, un organismo de este tipo se denomina diploide. Las células germinales (polen y oosferas de las plantas, espermatozoides y óvulos en los animales) tienen una matriz cromosómica llamada haploide. Cuando se dice que un organismo (vegetal o animal) es homocigótico para un gen particular, se asume que ha tenido la misma variante (o alelo) de este gen procedente de ambos padres. Lo contrario es heterocigótico, lo que significa que el organismo tiene dos variantes diferentes (alelos) del mismo gen.

El investigador danés Wilhelm Ludwig Johannsen hizo en el año 1903 la distinción entre el "genotipo", es decir, el conjunto de genes que determina el desarrollo potencial de un organismo, y el "fenotipo" o las propiedades visibles de la planta o animal, que resulta de la interacción entre el genotipo y el medio ambiente (o el mundo exterior). Se puede decir que el genotipo define todo el potencial genético de un individuo, mientras que el medio ambiente determina si los potenciales se expresan y en qué medida lo hacen. Al científico danés Johanssen se le atribuye también la denominación del término "gen" en el año 1909.

Al mismo tiempo, se demostró que los genes se ensamblan en estructuras de las células llamados actualmente cromosomas. Los cromosomas, por lo general (en organismos diploides), ocurren en pares –un cromosoma en cada par proviene de cada progenitor. Los cromosomas se distribuyen durante la división celular cuando se forman las células sexuales (meiosis) y se produce la recombinación de genes. En la meiosis, el número de cromosomas se reduce a la mitad, y en el caso de la fecundación –fusión entre el gameto masculino y una célula genital femenina– el número de cromosomas original es restaurado. El cromosoma de un organismo contiene la información genética determinante para la evolución y el fitomejoramiento. El número de cromosomas en las células vegetativas está indicado por 2n (o esporofítico) y es seguido por el número de cromosomas de la especie actual, por ejemplo, 2n = 18 para la col (Figura 3.10) o 2n = 56 para la frutilla (Figura 3.9).

El número reducido de cromosomas que se produce en las células germinales después de la meiosis se denomina estado gametofítico, que es seguido por el número de cromosomas, es decir, n = 9, para la col y n = 28, para la frutilla. En el año 1906, se describió el fenómeno de acoplamiento, lo que significa que los genes que residen en el mismo cromosoma no se heredan independientemente entre sí, sino que están ligados a bloques de herencia (vinculados entre sí). Los cambios genéticos espontáneos (mutaciones) son importantes para la evolución y para la domesticación de las especies animales y vegetales que se utilizan en la agricultura. Las investigaciones sobre las mutaciones se convirtieron en una herramienta para los estudios de varios cambios génicos.

Mendel estudió en el guisante o arveja (*Pisum sativum*) –que es una planta de autofecundación– las características controladas por genes y que no son afectadas significativamente por el medio ambiente. Por ejemplo, las semillas rojas y blancas o las semillas redondas y arrugadas. Sin esta investigación no se hubiese podido descifrar las leyes de la genética. El fitomejorador, por otra parte, tiene que manejar la autofecundación (o autogamia) y la polinización cruzada (o alogamia) para combinar diferentes características en la descendencia. Algunas de ellas se denominan características cualitativas, que son controladas por uno o pocos genes con un gran efecto en el fenotipo (o genes principales) y con categorías bien definidas del mismo. Ejemplos de tales características son la forma y la apariencia de las flores, las hojas, los frutos y las semillas. Así como también la resistencia específica de las plantas a ciertas enfermedades. En genética clásica, se habla de genes dominantes y recesivos. Los genes dominantes son aquellos en los que el heterocigoto– que tiene dos variantes diferentes del gen (o alelos)– muestra la característica asociada

a este gen, mientras que los alelos recesivos sólo muestran su fenotipo en la ausencia del alelo dominante. Sin embargo, la mayoría de las características de importancia agronómica dependen de muchos genes, cada uno con un pequeño efecto, o sea, por genes con efectos cuantitativos y denominados genes menores. El efecto de estos genes está a menudo influenciado por la interacción con otros genes (epistasis) y por diferentes factores ambientales. Los fenotipos de una población segregante que resulta de los cruzamientos entre dos padres no se pueden dividir en unas pocas categorías, sino que muestran una variación continua de la característica. Las propiedades cuantitativas son,

Figura 3.6. *La herencia del color floral en los guisantes fue una de las características que Gregor Mendel estudió para comprender los principios de la herencia. R = alelo dominante, r = alelo recesivo, P = generación parental, F1 = primera generación filial, descendiente híbrida, F2 = segunda generación filial (de descendientes de la F1). RR y rr son homocigóticos, es decir, con dos alelos iguales del mismo gen, mientras que Rr es un individuo heterocigoto con dos alelos diferentes de un mismo gen. En la generación F2, se obtiene, en promedio, una proporción de tres plantas con flores púrpuras (RR y Rr) versus una planta con flor blanca (rr).*

por ejemplo, el rendimiento, la madurez o las características relacionadas con la calidad, tales como, el contenido de proteína y el contenido de aceite en las semillas de varios cultivos. Estas cualidades se heredan de la misma manera que las características cualitativas, pero son mucho más difíciles de estudiar.

3.2. Fitomejoramiento 1.0 El desarrollo del fitomejoramiento moderno

El método de selección utilizado por los primeros fitomejoradores, que predominaba a fines del siglo XIX, se denomina Selección Masal (SM), lo que significa que las semillas de todas las plantas seleccionadas se mezclan, se siembran y se propagan en los años siguientes como una población. El procedimiento se repite año tras año. Este método es una copia directa de los mecanismos de selección natural, pero con la diferencia que el fitomejorador es el responsable de la selección. Durante la última década del siglo XIX, el método de selección genealógica (o también conocido como el método de Svalöf, por la localidad sueca del mismo nombre donde se inventó) se comenzó a utilizar en los cereales como el trigo, la avena, la cebada y otras especies de autofecundación. Con este método, se seleccionan plantas individuales de las familias segregantes y se cosecha sus semillas. Este método de selección da lugar a líneas genéticamente uniformes con un rápido aumento de los rendimientos. La selección genealógica permitió desarrollar variedades exitosas de muchos cultivos y todavía se utiliza rutinariamente en el fitomejoramiento actual.

Plantas autógamas (de autofecundación)

Las características de una planta dependen tanto de la herencia como del medio ambiente, pero sólo los cruzamientos y las mutaciones pueden lograr una nueva variación genética y nuevas combinaciones de características. Cuando este aspecto se comprendió a principios del siglo XX, se produjo una nueva etapa en el fitomejoramiento. Se reconoció que las poblaciones de las especies autógamas (o de autofecundación) consistían de

variedades genéticamente homogéneas (o sea homocigotas). Estas variedades permanecen genéticamente estables de generación en generación sólo porque son homocigotos para la mayoría de los genes (alelos). Tales variantes se llaman líneas puras. El cruzamiento de dos individuos pertenecientes a la misma línea homocigótica no da como resultado ningún beneficio genético. Por lo tanto, primero deben seleccionarse líneas puras con las características deseadas, luego cruzar individuos de diferentes líneas puras para obtener una variación genética deseable en la descendencia. A partir de aquello, se puede buscar y seleccionar nuevas variedades con características deseadas y mejoradas. El método original de cruzamientos entre dos líneas puras fue complementado posteriormente con cruzamientos más complejos usando tres, cuatro o más líneas parentales.

Figura 3.7. *Método de cruzamientos tradicionales en una planta de autofecundación para combinar diferentes genotipos en nuevas variedades. (A) Emasculación de las anteras; (B) Después de 2 o 3 días, el polen se transfiere de la planta del progenitor masculino al pistilo receptivo del progenitor femenino. En los cruzamientos entre diferentes variedades dentro de una especie (por ejemplo, cebada o trigo), el embrión se desarrolla habitualmente y las semillas pueden sembrarse de la manera habitual. En los cruzamientos entre diferentes especies a menudo no suelen desarrollar la semilla, pero el embrión inmaduro debe extraerse de la semilla (C) para cultivarse in vitro en un medio nutritivo (D). Fotografía: Roland von Bothmer.*

Las variantes del método original de selección genealógica consideran la selección en una generación posterior (por ejemplo, F3, tercera generación filial). Este método es eficaz cuando se desea transferir uno o varios genes de una variedad a otra.

Plantas alógamas (de fecundación cruzada) y fitomejoramiento por medio de híbridos y sintéticos

En las plantas alógamas o de fertilización cruzada, es decir, en especies en las que un individuo no se autofecunda, la progenie puede ser de familias de hermanos completos (progenitores masculinos y femeninos comunes) o de familias de medios hermanos (un progenitor en común). Por ejemplo, en la remolacha azucarera –cuyo ciclo de vida es de dos años– las raíces son seleccionadas por su tamaño, forma, peso y contenido de azúcar; éstas se plantan al año siguiente para que florezcan y puedan hibridarse, pero en campos (lugares) aislados para evitar la hibridación con otras líneas. Las semillas son cosechadas de cada planta y las familias de medios hermanos son sembradas en ensayos de diferentes sitios y años. Las semillas seleccionadas de las mejores familias se utilizan para la producción de semillas de élite que serán posteriormente futuras variedades para ser utilizadas por los agricultores.

El mejoramiento genético del maíz en los Estados Unidos de Norteamérica se realizó intensamente por muchos años, pero su progreso fue muy limitado hasta la década de los años 30 del siglo pasado, cuando se establecieron los principios genéticos básicos para la producción de la semilla híbrida.

La base para el mejoramiento de la semilla híbrida es la comprensión del efecto genético. Al autofecundar artificialmente una especie alógama como el maíz -es decir, de polinización cruzada, en que los gametos (masculino y femenino) que se unen para formar el cigoto son de plantas diferentes- se pueden obtener líneas homocigóticas que son similares a las líneas endocríadas de las especies autógamas. El cruzamiento entre las líneas puras, en una especie alógama, resulta con frecuencia en una descendencia híbrida significativamente mejor que ambos progenitores, ya que es más productiva. Este fenómeno se conoce como “Vigor Híbrido” o “Heterosis”.

Por lo tanto, el mejoramiento genético de semilla híbrida consiste en: (a) la endogamia y la selección en la producción de líneas endogámicas que son uniformes genéticamente (u homocigotas); (b) la selección y la prueba de líneas consanguíneas que se cruzan entre sí para obtener un descendiente superior; y (c) el uso de estas líneas puras mejoradas para la producción de semillas híbridas para su cultivo comercial.

Figura 3.8. *Para generar híbridos, el maíz, que es una especie de polinización cruzada, se autopoliniza (u homogeniza) por 5 a 7 generaciones, después de lo cual se seleccionan y cruzan líneas consanguíneas homogéneas seleccionadas (o líneas endogámicas) (P1 y P2) con buena habilidad combinatoria. Los descendientes de estos cruzamientos (híbridos F1) muestran vigor híbrido y mejor rendimiento. Las semillas de cruzamientos entre líneas puras se venden como cultivos híbridos F1.*

La gran diferencia entre la autofecundación y la fertilización cruzada es que, en una planta autógama, el fitomejorador produce una línea pura con las características deseadas y luego se venden las semillas de esta línea a los agricultores puesto que la línea pura es completamente homocigótica y, por lo tanto, genéticamente estable. El cultivador puede cosechar su propia semilla y asegurarse de que ésta tiene la misma constitución genética que la semilla que compró originalmente. La semilla híbrida de una planta alógama; sin embargo, es altamente heterocigótica y en la generación siguiente "es decir, la generación en que el agricultor podría usar su propia semilla" es muy variable, por lo tanto, inadecuada como semilla.

Para poder producir semillas híbridas, se debe prevenir la autopolinización. Esto puede hacerse por diferentes métodos, pero hoy en día para producir la semilla híbrida es muy importante prevenir la producción de polen (esterilidad masculina) de la línea endogámica. Esto asegura que las flores son polinizadas por la línea que debe ser el donador del polen. La esterilidad masculina que permite la producción de semillas híbridas se encuentra actualmente en muchos cultivos de fertilización cruzada, tales como: el sorgo, el centeno, el girasol, la colza o la remolacha azucarera, entre otras. En el maíz también se ha utilizado un sistema de esterilidad genética que elimina funcionalmente las flores masculinas en la línea madre. Con el desarrollo de nuevos sistemas de hibridación en el futuro, el número de cultivos híbridos aumentará significativamente. A modo de ejemplo, varios fitomejoradores trabajan actualmente en sistemas de producción de semilla híbrida para el trigo.

Muchas plantas forrajeras -como, por ejemplo, el fleo y otras gramíneas, así como diferentes leguminosas como el trébol- son alógamas y tienen pequeñas flores que hacen difícil controlar su polinización cruzada. En éstas, el fitomejorador selecciona a las mejores familias de medios hermanos de acuerdo a su habilidad combinatoria, es decir, su valor determinado por su progenie híbrida en la productividad u otra característica de interés. Un número de plantas obtenidas de las mejores combinaciones se cruzan en forma aislada y la semilla de éstos se convierte en el nuevo cultivo llamado "sintético".

Cruzamientos interespecíficos y mejoramiento genético de plantas poliploides

Muchas de las plantas utilizadas en la agricultura son híbridos entre diferentes especies, algunas generadas espontáneamente, y otras a través de cruzamientos artificiales. Ejemplos conocidos son la colza, las frutillas y muchos cítricos. Casi todas las orquídeas y lirios vendidos son híbridos inter específicos. La Figura 3.9

muestra el origen por cruzamiento interespecífico para el caso de la frutilla (fresa).

Figura 3.9. *Desarrollo de la frutilla moderna,* ***Fragaria ananassa****, a través del cruzamiento entre especies silvestres de* ***Fragaria*** *(ambas con 56 cromosomas) que fueron introducidas a Europa en el siglo XVIII.*

A comienzos de la década de los años 30 del siglo pasado estaba claro que la poliploidía –un aumento espontáneo del número de cromosomas– ha jugado un papel importante en la evolución de las plantas superiores, y que varios cultivos importantes son poliploides (por ejemplo, el trigo y la papa). Se encontró que un aumento en el número de cromosomas se correlaciona frecuentemente con el aumento del tamaño celular y el desarrollo de los principales órganos vegetativos. Este conocimiento despertó el interés en la producción de poliploides artificiales.

Las especies tetraploides, con cuatro copias de cromosomas homólogos, y las hexaploides, con seis copias, representan estas especies poliploides. El trigo harinero/panadero (*Triticum aestivum*) es hexaploide y su origen ocurrió en un tiempo relativamente tardío a través de un cruzamiento espontáneo entre el trigo tetraploide emmer (*Triticum dicoccum*) y la especie diploide silvestre *Aegilops squarrosa*. Los híbridos resultantes fueron triploides y, posteriormente, su número de cromosomas se duplicó, lo que permitió obtener el trigo harinero que conocemos en la actualidad. Este es quizás el mayor avance en la larga historia del fitomejoramiento y se produjo en épocas prehistóricas, espontáneamente, sin implicación humana.

La colza se origina de un cruzamiento espontáneo entre la col (especie diploide) y el nabo, cuyo número de cromosomas fue duplicado por la naturaleza originalmente (para las semillas híbridas de cultivos recientes de colza sus números de cromosomas se duplicaron artificialmente). Muchos de los cultivos que utilizamos son triploides (con tres copias de cromosomas homólogos), como el azafrán y el plátano o banano.

Figura 3.10. *El famoso triángulo de U. El botánico coreano-japonés Woo Jang-choon (cuyo nombre en Japón se pronunciaba como Nagahara U) describió en la década de los años 30 cómo se relacionan diferentes especies de* ***Brassica*** *cultivadas y silvestres. Tres de estas especies han ocurrido a través de cruzamientos entre tres especies diploides con duplicación cromosómica. Las especies diploides tienen tres conjuntos cromosómicos diferentes: el nabo con A, la mostaza negra con B y el repollo con C.*

La poliploidización y las hibridaciones artificiales también se han utilizado en el fitomejoramiento. El triticale es un cereal híbrido creado por el hombre por cruzamiento entre trigo y centeno (*Secale cereale*). En estos cruzamientos se ha utilizado el trigo harinero (*Triticum aestivum*) o el trigo duro (*Triticum durum*), aunque el último es el más común. En algunas especies forrajeras, como el *Lolium* (ballica o ryegrass) y la festuca, también se han generado cruzamientos interespecíficos; un ejemplo moderno es el festulolium generado al cruzar *Lolium* spp. X *Festuca* spp. Por otro lado, en el trébol rojo o rosado también se han desarrollado variedades tetraploides en forma artificial. Muchos cultivos antiguos de la remolacha azucarera fueron triploides y tenían rendimientos más altos que los cultivos diploides y tetraploides, pero hoy se utilizan principalmente los híbridos diploides.

Mutaciones inducidas en el fitomejoramiento

A inicios del siglo XX, los investigadores estadounidenses encontraron que los rayos X y el tratamiento con ciertas sustancias químicas podrían inducir mutaciones, o sea, cambios en los genes individuales. Estos cambios inducidos, aunque aleatorios, son una herramienta poderosa para el fitomejoramiento. Se intentó también usar rayos X y otras radiaciones ionizantes, como rayos gamma y neutrones, así como diversas sustancias químicas como mutágenos. Durante la segunda mitad del siglo XX, se realizaron grandes esfuerzos para aumentar la frecuencia de las mutaciones útiles y para controlar el proceso para su obtención. El método dio lugar a muchas variedades registradas, algunas de las cuales tuvieron un gran impacto en la agricultura. Un ejemplo llamativo de este gran impacto es la mutación para el fotoperiodo neutro en la cebada, producida por investigadores suecos. Esto significa que la cebada, que suele ser una planta adaptada a las condiciones de días largos en latitudes septentrionales, puede también ser cultivada en áreas subtropicales con días más cortos. El gran número de mutantes producidos en la cebada ha sido muy relevante para la investigación sobre la bioquímica de muchos fenotipos diferentes.

Originalmente el cultivo de la remolacha azucarera demandaba un trabajo muy laborioso, principalmente debido a que las semillas de la remolacha en forma natural están en agregados de 2–3 semillas juntas, lo que obligaba a ralear el cultivo. A principios de la década de los años 50, se encontró un mutante que dio lugar a semillas individuales. Después de un largo período de cruzamientos, a mediados de la década de los años 60, se liberaron variedades de remolacha monogérmicos –o de una sola semilla– que se convirtieron en un gran éxito. El mejoramiento de la remolacha azucarera se desarrolló a través de una tecnología que utiliza métodos sofisticados de semilla híbrida basados en la esterilidad y la poliploidía masculinas.

Figura 3.11. *El cultivo de la remolacha azucarera ganó un impulso significativo cuando se introdujeron las nuevas variedades monogérmicas (o de una sola semilla) en la década de los años 60. A, B: cultivo monogérmico; C, D: cultivo multigérmico (multi-semilla).*

La mutación inducida como método de fitomejoramiento también se ha utilizado en los cultivos y plantas ornamentales propagadas vegetativamente. Desde mediados de los años 80, se ha utilizado la inducción de mutaciones genéticas en el fitomejoramiento. Sin embargo, los nuevos métodos para la producción de OGM que han tenido un bloqueo político en Europa, han llevado a un renovado interés en el uso de mutaciones inducidas para el fitomejoramiento.

Figura 3.12. *La investigación y el fitomejoramiento a través de las mutaciones inducidas fueron una especialidad sueca durante décadas. Nuevas variedades, principalmente en la cebada, se produjeron durante los años 1950s y 1960s. Aquí hay algunos ejemplos entre los miles de mutantes producidos. (A) Mutante encapuchado, con la lema transformada en un casquillo en forma de cuenco que a veces se convierte en un núcleo; (B) Mutante necrótico con manchas distintas y muertas en las hojas; El mutante necrótico a la izquierda y la variedad original 'Bonus' a la derecha; (C) Un mutante con gluma externa alargada y el tipo normal de 'Bonus' a la derecha; (D) mutante secuencial (erectoides) a la izquierda y su madre 'Bonus' a la derecha. Fotografía: Udda Lundqvist.*

Cultivo celular y cultivo de tejidos

El cultivo celular y el cultivo de tejidos in vitro incluyen rescate y germinación de embriones, tejido de meristemas, oósferas, tallos, polen, células individuales y células sin paredes celulares (o protoplastos). El cultivo celular y el cultivo de tejidos son hoy un requisito previo para la mayoría de las aplicaciones biotecnológicas en el fitomejoramiento. Estas técnicas son también herramientas importantes en las especies de plantas donde el fitomejoramiento tradicional no se puede realizar fácilmente. Éstos incluyen a los que no pueden formar semillas viables, tales como los plátanos, la mayoría de los cítricos y las uvas sin semilla. En muchas plantas de autopolinización se utilizan el cultivo de polen o anteras para duplicar el número de cromosomas. Esto permite que el genotipo se fije en un solo paso

y el proceso del fitomejoramiento se acorte de 2 a 4 años en el trigo, la cebada, la colza, entre otros.

Figura 3.13. *El cultivo celular y el cultivo de tejidos son técnicas importantes en el mejoramiento genético moderno. Los protoplastos (A) son células vegetales sin pared celular que tienen una forma esférica en una solución nutricional líquida. Los protoplastos de diferentes especies pueden ser fusionados y dar lugar a un tipo de híbridos que no pueden ser producidos a través de cruzamientos. Los trozos de tejido (explantes) sobre un sustrato nutriente sólido (B) pueden regenerarse y dar lugar a un gran número de nuevas plantas. Regeneración de plantas en Pelargonium zonale a partir de una masa celular indiferenciada (callo). Fotografías: Roland von Bothmer (A) y Margareta Welander (B, C).*

Otras especies vegetales pueden generar progenies pero que no pueden utilizarse como variedades directamente. Por lo tanto, en estas especies -por ejemplo en las manzanas y peras- deben propagarse vegetativamente por injerto, es decir, una ramita del cultivo de manzano que deseamos propagar puede crecer con una raíz de un árbol de otra variedad. Las flores de los manzanos y los perales que se encuentran en nuestros jardines deben ser polinizadas. La pulpa de la fruta obtiene su material genético del cultivo progenitor y, por lo tanto, su sabor y otras características. De un árbol de manzano del tipo 'Golden Delicious' se cosechan manzanas donde la pulpa sabe a 'Golden Delicious'. El material genético de las progenies, por otra parte, es una mezcla de los genes de la madre y de las plantas polinizadoras. Si se siembra su semilla habrá todo tipo de sabores en las manzanas de las plantas adultas, en su mayoría menos apetitosas.

Para muchas especies de plantas, la propagación a través de la clonación es muy fácil. En horticultura la clonación es muy común. Los pelargones, las fucsias, las petunias y varias especies de plantas ornamentales se propagan siempre con esquejes. Para las especies donde las podas no se pueden realizar fácilmente, en algunos casos se propagan por cultivos celulares y cultivos de tejidos, es decir, no en el suelo sino en un medio de cultivo. También se pueden utilizar cultivos celulares para algunas formas de fitomejoramiento avanzado; por ejemplo: por fusiones de protoplastos en las que se pueden agrupar células con todo el conjunto cromosómico de dos especies para la producción de una "especie sintética". Las técnicas analizadas anteriormente no suelen estar reguladas por la legislación de OGM, aunque la mayor parte o la totalidad involucra cambios en la composición genética de las especies que no se han generado espontáneamente.

3.3. Las bases para el fitomejoramiento – recursos genéticos y premejoramiento genético

Los bancos de germoplasma del mundo

El genetista ruso Nikolai I. Vavilov fue el primero en darse cuenta de la importancia de preservar la amplia variación genética de las antiguas razas de especies vegetales para el futuro del fitomejoramiento. Vavilov y sus asociados viajaron alrededor del mundo en las décadas de los años 1910 y 1920 y recolectaron un rico y variado material de semillas de una gran cantidad de cultivos, incluyendo variedades de agricultores, así como los parientes silvestres de los cultivos actuales. Estas colecciones sentaron las bases para el concepto moderno de bancos de germoplasma. En la actualidad, hay alrededor de 1,500 bancos de germoplasma en todo el mundo que preservan los recursos genéticos locales o regionales. Varios países han creado sus propios bancos nacionales de germoplasma. En muchas áreas, los países han formado conjuntamente bancos de germoplasma regionales. Ejemplos de esto son los países de la SADC (Southern African Development Community) en el sur de África y NordGen, el banco de germoplasma que es común a los cinco países nórdicos de Europa. El CGIAR es una asociación global que reúne a organizaciones que trabajan con la seguridad alimentaria en diferentes áreas del mundo. Varios centros o institutos del CGIAR han establecido sus bancos de germoplasma regionales con material importante de sus respectivos cultivos o áreas de responsabilidad. Algunos de estos son el Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI) en Filipinas, el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) en México, el Centro Internacional de la Papa (CIP) en Perú, el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) en Colombia, y el Centro Internacional de Investigación Agrícola en las Zonas Áridas (ICARDA) que anteriormente se encontraba en Alepo (Siria), pero fue trasladado a Rabat, en Marruecos, debido a la guerra prolongada en Siria. ICARDA es responsable del fitomejoramiento para zonas áridas temperadas y principalmente en cultivos como la cebada, trigo y leguminosas. Además de los bancos de germoplasma oficiales nacionales o regionales, las compañías de fitomejoramiento también tienen sus propios bancos de germoplasma, donde conservan el valioso material que se recolectó durante muchos años y tienen un muy buen conocimiento sobre el contenido de sus genes.

En total, existen en la actualidad más de 7 millones de muestras (accesiones) de semillas en los bancos de germoplasma del mundo. Algunas son duplicadas, es decir, la misma variedad o muestras de semillas se encuentran en varios bancos de germoplasma, pero el número total de muestras de semillas únicas se estima en aproximadamente 2 millones. Sin embargo, el sistema de bancos de germoplasma puede ser muy vulnerable. Por ejemplo, muchos bancos de germoplasma están amenazados por desastres naturales, guerras o problemas técnicos. Por lo tanto, es importante que existan copias almacenadas en otro lugar, separadas del propio banco de germoplasma. Uno de estos almacenes de recursos fitogenéticos es la bóveda de semillas internacional en Svalbard (en Noruega), donde las copias de seguridad de los bancos de germoplasma del mundo se almacenan en cámaras en lo profundo de la roca madre.

Figura 3.14. *La Bóveda Global de Semillas en Svalbard (Noruega) - Sistema de respaldo de seguridad para los bancos de germoplasma del mundo. Fotografía: Roland von Bothmer.*

El concepto del banco de germoplasma significa que se debe recolectar y preservar la mayor cantidad posible de diversidad genética de las especies para ser utilizada ahora y en el futuro en la investigación y el fitomejoramiento. Se debe generar conocimiento sobre cada muestra individual colectada: un banco de germoplasma sin información sobre el contenido de sus colecciones (genes) es de poco valor. Por ejemplo, cuanto más se sepa sobre las características de resistencia a patógenos y pestes y la tolerancia al estrés o la calidad, mayor será su valor.

Un problema general ha sido previamente la baja o inadecuada cooperación entre los bancos de germoplasma, la investigación académica y el fitomejoramiento práctico. Los bancos de germoplasma se han concentrado en ser conservadores de recursos genéticos y por lo general no han estado involucrados en la utilización del material que preservan. Los mejoradores han considerado que hay suficiente variación genética disponible para cubrir la necesidad de su programa de fitomejoramiento en un futuro previsible, sin tener que recurrir a los bancos de germoplasma. Los investigadores a menudo solo recurrieron a los bancos de germoplasma para obtener semillas para sus estudios. Estos enfoques están cambiando radicalmente en la actualidad. Ahora se ven a los diferentes actores como partes de una cadena ininterrumpida que ha llevado a colaboraciones cada vez mayores y fructíferas.

Pre-mejoramiento genético

El acceso a una gran variación genética es crucial para resolver las demandas del mañana. Los cultivos más antiguos y los parientes silvestres de nuestros cultivos contienen una variación genética valiosa tanto para la mejora del rendimiento como para otras características específicas. El trabajo que debe llevarse a cabo antes de que comience el fitomejoramiento con material genético de élite es, por ejemplo, utilizar recursos genéticos exóticos que no están adaptados a las condiciones del agricultor, lo que se denomina pre-mejoramiento, y es un eslabón importante en la cadena del mejoramiento genético de los cultivos.

La gran oposición de los fitomejoradores para usar estas fuentes de genes “primitivas” ha significado que los recursos fitogenéticos en los bancos de germoplasma han sido subutilizados. El pre-mejoramiento se considera actualmente un área de desarrollo común e importante para la sociedad, donde se consideran los bancos de germoplasma, la investigación académica y las compañías de semillas. Los fitomejoradores han reconocido, sobre todo, ante el cambio climático y la contaminación ambiental, que se debe trabajar con un material genético más amplio para obtener nuevas características y combinaciones de ellas para una mejor adaptación y satisfacer las demandas del mercado. La sociedad se ha dado cuenta de que la conservación y utilización de los recursos genéticos debe ser apoyada con más fuerza. Por lo tanto, en los países nórdicos de Europa desde el año 2011 se ha establecido una asociación público-privada (PPP) para el pre-mejoramiento, con la finalidad de ampliar la base genética, focalizándose en la introducción de genes identificados en un germoplasma ya adaptado y desarrollando métodos modernos de selección, usando la genómica. Esta plataforma de cooperación es apoyada económicamente por los cinco países nórdicos y nueve compañías nórdicas de fitomejoramiento. Los proyectos de colaboración se llevan a cabo entre las empresas y las

universidades nórdicas. NordGen es el coordinador de esta alianza público-privada. Existen programas similares de pre-mejoramiento en varios países europeos, incluyendo Alemania, Francia y el Reino Unido.

¿Qué material utiliza un fitomejorador?

Utilizando métodos de mejoramiento "tradicionales", se necesitan al menos entre 8 y 10 años para producir una nueva variedad: un trabajo minucioso con experimentos de laboratorio y una serie de ensayos de campo, así como el análisis de calidad, las pruebas de campo para ver la adaptabilidad a las prácticas agrícolas y la selección a otras características deseadas. A partir de entonces, se requieren 2 a 3 años de pruebas oficiales antes de que la nueva línea o variedad se pueda aprobar en la lista oficial de variedades y se pueda comercializar. Este proceso debe ser continuo; las enfermedades antiguas pueden extenderse a nuevas áreas, se pueden generar nuevas razas de patógenos que rompen la resistencia varietal y los factores ambientales también pueden cambiar. Además, constantemente se agregan nuevas demandas de los productores y consumidores. Con el largo tiempo que toma crear una nueva variedad, un fitomejorador debe tener una idea de lo que demandará el mercado ¡en 10 años al menos!

Este largo tiempo también significa que el fitomejorador debe producir continuamente nuevas variedades. Esto generalmente implica que, en la mayor parte de su trabajo, no se arriesga con germoplasma de partida incierto (que no sea conocido), sino que utiliza líneas mejoradas o variedades disponibles como material de partida, en lugar de tomar material "exótico", como especies silvestres o cultivos de agricultores de otras áreas que no están adaptadas al área específica donde se cultivará la nueva variedad.

Los parientes silvestres, variedades antiguas y material exótico no adaptado a las condiciones pueden tener genes interesantes, pero también una gran cantidad de propiedades indeseables. Como resultado, el proceso de fitomejoramiento a partir de dichos materiales se extiende significativamente y, en lugar de 10 años, pueden pasar entre 15 y 20 años antes de que una nueva variedad llegue al mercado. Este es un horizonte demasiado largo desde una perspectiva económica empresarial. El lema utilizado a menudo "cruzar lo mejor con lo mejor para obtener algo aún mejor" puede implicar que la variación genética a menudo, pero no siempre, ha disminuido en los cultivos modernos.

Figura 3.15. *La variación genética se encuentra hoy en los ensayos de campo del fitomejorador (A), en su propio suministro de semillas o en los bancos de germoplasma. Los cultivos comerciales son genéticamente uniformes en las especies autógamas (B, cebada), mientras que existe una variación genética en las especies alógamas (C, centeno). Un campo de cebada o trigo debe ser "liso como un piso de salón" (D). Fotografía: Roland von Bothmer.*

Con la utilización de la tecnología moderna, el tiempo del proceso del fitomejoramiento se reduce. La automatización de las operaciones y el análisis permite que las pruebas se realicen de manera eficiente; también en mayor escala que antes. La selección se puede hacer en una etapa muy temprana y los tiempos entre generaciones pueden reducirse significativamente. Esto último es especialmente importante para el fitomejoramiento de los árboles forestales. Los progresos también significan avances más rápidos en los cultivos y más interesantes para la industria semillera como son: el maíz, la soya, el algodón, el arroz y la colza, es decir, donde la biotecnología moderna puede ser utilizada.

En un mundo que cambia rápidamente, en el que una resistencia a una enfermedad o plaga de un cultivo; a menudo, pierde su efecto en unas pocas generaciones, debido a nuevas variantes del patógeno o se hacen nuevas demandas de ciertas características (especialmente en el uso o calidad) sobre los cultivos; es importante que se reemplacen rápidamente las variedades utilizadas. Por lo tanto, la identificación de genes para las características deseables y su rápida transferencia al material de fitomejoramiento es cada vez más importante. Con la genómica y la ingeniería genética en curso y en el futuro, las posibilidades de identificar, caracterizar, aislar e introducir genes serán mejoradas y favorecidas dramáticamente. Si se dispone de recursos suficientes para este tipo de trabajo; aquello será de gran importancia para nuestra capacidad de satisfacer futuras demandas crecientes del mercado.

3.4. Fitomejoramiento 2.0 Nuevas herramientas para el fitomejoramiento actual

Plantas modificadas genéticamente

Introducir genes en una planta de otro organismo, a veces sin relación filogenética, sin usar cruzamientos o mediante genes diseñados por un investigador se llama transgénesis (véase más adelante). La transgénesis es el punto central de la legislación de ingeniería genética, a pesar que no todas las técnicas actuales de mejoramiento genético molecular debieran ser consideradas dentro del concepto de transgénesis.

El método más antiguo, sencillo y ampliamente utilizado para producir plantas Genéticamente Modificadas (plantas GM) utiliza el plásmido Ti (Ti = inducción tumoral) de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens*. Un plásmido es una pieza circular parte del genoma de una bacteria que no está unida al cromosoma. En la década de los años 70, se descubrió que la bacteria Agrobacterium, que infecta en forma natural varias especies de plantas y da lugar a tumores, tiene una región particular del plásmido Ti que puede ser transferido e integrado al ADN de la planta. Para producir plantas modificadas genéticamente (GM), se debe eliminar los genes de la bacteria que causan tumores en la planta, reemplazándolos por los genes que se desea introducir. El gen introducido puede provenir de una planta de la misma especie o de una especie distinta.

Casi todas las dicotiledóneas (plantas angiospermas con dos cotiledones) y algunas monocotiledóneas (plantas angiospermas con un solo cotiledón) pueden ser transformadas usando Agrobacterium. Sin embargo, para las plantas monocotiledóneas, existen otros métodos de transformación más sencillos. Hoy en día, la mayoría de los cultivos, incluyendo los principales cereales y leguminosas, pueden ser transformados. Para transformar *Arabidopsis thaliana* –una de las plantas modelo que tiene una gran distribución natural en el mundo– sólo debe sumergirse su inflorescencia en una solución con Agrobacterium donde se agrega cierto detergente.

Figura 3.16. *La planta modelo (**Arabidopsis thaliana**) se sumerge en una solución de Agrobacterium con detergente para obtener una planta GM. Fotografía: Stefan Jansson.*

¿Cómo saber lo que hace un gen?

Un requisito previo para el uso de la ingeniería genética en el fitomejoramiento es que los genes de interés (a usar) puedan ser identificados. El gen genera una copia de sí mismo, un ARN mensajero (ARNm), que es una cadena de nucleótidos simple que se forma durante el proceso de transcripción del ADN al ARN para dar lugar a una proteína en particular. Las proteínas, a su vez, determinan y afectan las propiedades de la planta. Todas las células de un individuo tienen los mismos genes, pero éstos a menudo son activos sólo en ciertas partes del organismo y durante períodos más cortos o más largos durante su vida. Mucho trabajo se ha centrado en la cartografía de los genes en dos plantas modelo, *Arabidopsis thaliana*, para las dicotiledóneas, y el arroz (*Oryza sativa*), para las monocotiledóneas. Después del cambio de milenio, el rápido desarrollo tecnológico ha generado un conocimiento más profundo de las funciones genéticas, incluso en otras especies. Al conocer la función específica de un gen en una especie, se obtiene a menudo una buena idea de la función de los genes similares en otras especies. Los genes pueden ser más o menos iguales, con respecto a su secuencia de ADN o al orden en que se encuentran en los cromosomas. Generalmente su estructura se ha conservado durante la evolución de modo que los alelos de un gen particular sean frecuentemente los mismos.

Para descubrir qué hace un gen, casi siempre se usan plantas GM. Un método habitual es silenciar un gen particular para que no afecte las propiedades del organismo. Si se compara una planta que tiene todos sus genes intactos con otra donde un gen ha sido modificado, se puede entender la función de ese gen en particular. Alternativamente, se puede aumentar la actividad del gen para ver las funciones que se han modificado. Estos métodos de reducir o aumentar la expresión génica mediante la ingeniería genética "que se utilizan actualmente en una escala limitada" serán en un futuro herramientas muy importantes para el fitomejoramiento, si las leyes de los países permiten el uso de dichas metodologías.

Figura 3.17. *Las especies de plantas son muy diferentes en la naturaleza. La planta* ***Arabidopsis thaliana*** *tiene sólo 1/20 del ADN de un humano, mientras que otras de las especies vegetales tienen 7 veces más ADN que el humano. Sin embargo, el número de genes es aproximadamente el mismo para todas las especies.*

Ingeniería genética en el fitomejoramiento

En la década de los años 80, cuando las primeras plantas se transformaron, la función de algunos genes en las plantas apenas se conocía. La mayoría de los genes que se transformaron en plantas eran aquellos afectados por bacterias o virus. Las únicas propiedades que se podían cambiar eran aquellas donde se podían utilizar estos organismos, tales como tolerancia a los herbicidas o a ciertas enfermedades virales. En la actualidad, cuando se conoce la función de decenas de miles de genes de plantas, todos estos pueden ser utilizados en los procedimientos de fitomejoramiento. En algunos casos, se puede utilizar ungen de una especie relacionada, a veces un gen de la misma especie (u otra especie vegetal) y en otros casos de una especie no relacionada. La ingeniería genética puede ayudar considerablemente al fitomejorador a cambiar diversas características que no se pueden alterar por métodos convencionales.

3.5. Fitomejoramiento 3.0 El fitomejoramiento del futuro

Durante el siglo XXI, la producción y el análisis de las plantas genéticamente modificadas (OGM) se ha desarrollado considerablemente, y se han obtenido progresos aún mayores en el campo de la genómica a través de la ingeniería genética y los estudios de la variabilidad natural dentro y entre especies. El genoma completo de un gran número de especies de plantas ha sido descrito, lo que proporciona una fuente abundante para estudiar los genes que controlan diferentes propiedades. Este conocimiento es muy valioso y se puede utilizar para el desarrollo del fitomejoramiento moderno. Esto significa que en la actualidad se puede determinar con relativa facilidad la secuencia del ADN de diferentes individuos de la misma especie. Uno de los mayores logros en la última década de la genética molecular ha sido la caracterización de la variabilidad con respecto a la secuencia del ADN existente dentro de una especie y que puede en algunos casos ser muy grande. Por ejemplo, dos variedades comerciales de maíz pueden tener dos tercios de su genoma en común y un tercio distinto.

El siglo XXI ha sido testigo de avances científicos que han determinado que el límite entre el fitomejoramiento tradicional y aquel generado con ayuda de la ingeniería genética (Fitomejoramiento 1.0 y 2.0, respectivamente) sea difuso.

Marcadores moleculares y selección

El avance en el conocimiento de las plantas y la disponibilidad de los marcadores moleculares han influido en el trabajo tradicional de los cruzamientos y la selección de nuevas combinaciones de genes. Los marcadores moleculares son secuencias de ADN específicas por las cuales el fitomejorador puede identificar y hacer seguimiento de los genes de interés en una población determinada. Hoy en día, una gran cantidad de marcadores moleculares se utilizan para seleccionar qué progenitores son apropiados para los cruzamientos, haciendo un “perfil de ADN” que cubre todo el genoma. Esto ha significado que con el fitomejoramiento se puede seleccionar de una manera más eficiente y más barata para las características controladas por muchos genes. Esto se puede hacer independientemente de la tecnología utilizada para la generación de OGM y, por lo tanto, ha comenzado a tener un gran impacto práctico. Algunas formas de modificación genética permiten que este proceso sea aún más efectivo. En plantas, como los árboles, que florecen después de muchos años, el tiempo entre generaciones puede ser drásticamente reducido por el uso de la ingeniería genética al hacerlos florecer antes. Dado que la eficiencia del fitomejoramiento depende directamente del tiempo entre generaciones, esto da como resultado mayores ganancias genéticas por año. El gen insertado para adelantar la floración puede posteriormente ser eliminado por cruzamientos convencionales antes de que las variedades sean liberadas en el mercado. Un número creciente de países están implementando enfoques regulatorios en los cuales, si un producto desarrollado por ingeniería genética no contiene ADN proveniente de otro organismo, entonces no es considerado un OGM.

La esterilidad masculina – es decir, algunas plantas no pueden producir polen – se ha utilizado durante mucho tiempo en diversos cultivos para producir híbridos (descrito anteriormente). El extenso y costoso trabajo para eliminar los gametos masculinos, actualmente utilizadas en la producción de semillas híbridas de maíz, puede evitarse mediante un sistema en el que las plántulas no se someten a daños mecánicos resultando en una mayor cosecha de semillas y una mejor calidad de la misma. Esta técnica también se basa en la modificación génica, pero las semillas no contienen transgenes.

Cambios en la expresión génica utilizando Cisgenia

Una gran proporción de las plantas GM generadas con fines de investigación, además de usar cualquier forma de marcador seleccionable, no han recibido ningún gen de otro organismo, sino que sólo han aumentado o disminuido la expresión de uno de sus genes que son propios de la especie, y son llamados cisgénicos, los cuales se diferencian de los transgénicos porque

los últimos poseen genes de otras especies, mientras que en los cisgénicos se trabaja con genes de organismos de la misma especie o especies sexualmente compatibles. Sin embargo, los cisgénicos son tratados de la misma manera que los transgénicos por la legislación regulatoria europea porque su producción se basa en el uso de la misma tecnología que en los transgénicos. Con el conocimiento actual de la variación genética dentro de una especie vegetal, se sabe que tales diferencias son comunes en poblaciones naturales o producidas continuamente a través de mutaciones espontáneas. La Agencia Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) indica que los riesgos de las plantas cisgénicas no son ni mayores ni menores que aquella obtenidas por el fitomejoramiento convencional, pero este conocimiento no se consideró cuando la legislación fue inicialmente formulada, de lo contrario podría haber sido diferente.

Mutaciones específicas obtenidas por técnicas de edición

Hoy se abren posibilidades de lograr cambios genéticos específicos en los cultivos a través de las nuevas herramientas de fitomejoramiento. No es necesario obtener la variante deseada de otra especie (transgénicos) o de otro individuo de la misma especie (cisgénicos). Los cambios pueden ser los mismos que pueden ocurrir a través de mutaciones espontáneas o en las mutaciones inducidas con radiación ionizante o productos químicos, pero aquí se presentan de una manera específica. Las nucleasas con dedos de zinc (ZFN, del inglés zinc-finger nucleases) son enzimas de restricción artificiales creadas a partir de la fusión del dominio dedo de zinc de unión al ADN con un dominio de ruptura de ADN. Las nucleases (ZFN) es un grupo de proteínas que se encuentran en prácticamente todos los organismos. Estos pueden reconocer y unirse a sitios específicos en el genoma y abrir la cadena de ADN que la planta percibe como una lesión. Cuando este daño es reparado por la planta, algunas diferencias surgen de la cadena de ADN original. Por lo tanto, el método implica la inducción de mutaciones en sitios predeterminados en el genoma. Las nucleasas tipo activadores de transcripción (TALEN) se pueden usar para dar el mismo resultado. Los cambios se pueden obtener con estas técnicas, pero sin introducir un nuevo gen en la planta que codifica la nucleasa (una proteína) que, a su vez, realiza la mutación. También es posible producirlo en un tubo de ensayo o cultivo de células y luego insertarlo en la planta sin introducir el gen. En el primer caso, el cambio puede caer dentro de la legislación de OGM, pero probablemente no en el segundo, aunque el resultado final es idéntico y no es posible ver qué método se ha utilizado. Una colza tolerante a herbicidas que no se considera como OGM ha sido producida por una técnica relacionada llamada mutagénesis dirigida por oligonucleótidos (ODM). Una nueva tecnología se basa en las nucleasas de secuencias palindrómicas repetidas inversas (CRISPR-Cas), que es aún más efectiva en la producción de mutaciones específicas. Las plantas producidas con CRISPR, que no contienen ADN proveniente de otro organismo, no deberían ser consideradas como OGMs.

La edición de genes genera cambios en sitios específicos del genoma. Otras NBTs (New Breeding Technologies) permiten transferir limitadas cantidades de ADN entre genotipos (por ejemplo, a través de injertos que no han sido genéticamente modificados en porta-injertos que si han sido modificados genéticamente), o modificar sin hacer cambios en la secuencia genómica a través de la metilación del ADN (o alteraciones epigenéticas). También se puede insertar secuencias de ADN entre individuos que son sexualmente compatible a través de la cisgénesis o silenciar la expresión de genes. La agro-infiltración y la ingeniería reversa son otras NBTs. A través de la ingeniería reversa se obtienen líneas parentales homocigotas de una planta heterocigótica seleccionada, mientras que la agro-infiltración permite seleccionar plantas con fenotipos valiosos que luego se pueden usar en cruzamientos o como una plataforma de producción de proteínas recombinantes de alto valor. La biología sintética también facilita construir genomas de novo. Las NBTs aumentan la variación genética, aceleran la obtención de nuevas variedades con características que no se podrían lograr a través del mejoramiento en base a cruzamientos e incrementan su precisión. Varias de estas NBTs logran obtener plantas que no incluyen secuencias transgénicas lo que dificulta diferenciarlas de aquellas obtenidas por cruzamientos o mutaciones inducidas.

Las compañías de semillas ya las utilizan y varios de sus productos ya están entrando en el mercado.

Predicción o selección genómica

En la predicción genómica, los efectos de alelo son estimados en una población de entrenamiento (training population o TRN) por un modelo –basado en datos fenotípicos, marcadores genéticos derivados del ADN y la genealogía de los individuos incluidos en la TRN– que se utilizará en todos los pasos posteriores. En la población de mejoramiento (breeding population o TST) estos efectos se utilizan para estimar los valores genómicos predichos que se correlacionan con los valores fenotípicos reales. Este valor de correlación se denomina exactitud predictiva, que es un indicador importante de eficiencia. La TST es el objetivo de predicción genómica. Se realiza la predicción basada en la información genómica y los genotipos se seleccionan en las primeras etapas (o sea, plántulas), utilizando los efectos de los alelos como criterios de selección. La predicción genómica para selección se beneficia del fitomejoramiento rápido, que es una herramienta poderosa para acelerar el mejoramiento de cultivos. En un invernadero con un foto-período variable natural (10–16 horas) se pueden obtener 2 o 3 generaciones de trigo, cebada, garbanzos y colza por año, mientras que con el fitomejoramiento rápido se logran 4 a 6 generaciones de estos cultivos en un año. En cereales se basa en la recolección de espigas inmaduras y su secado en un horno o deshidratador (~ 3 días), lo que permite un ciclo de semilla a semilla más rápido versus el proceso normal de maduración de la semilla (15 días) aunque hay una pérdida de peso del grano.

4. ¿QUIÉN ES QUIÉN EN EL FITOMEJORAMIENTO?

A mediados del siglo XIX, la agricultura se transformó radicalmente. Surgió una nueva tecnología para el desarrollo de los cultivos, se diseñaron e introdujeron herramientas y maquinaria nuevas y más eficientes, comenzando en las regiones agrícolas más ricas en los Estados Unidos de Norteamérica y Europa. El cultivo todavía se basaba en el hecho de que cada agricultor producía su propia semilla cada año, a menudo con grandes variaciones en la calidad y la estabilidad de las variedades desarrolladas para cada área geográfica. Surgió un comercio de semillas, basado en la gran necesidad de semillas frescas y de alta calidad. Esto fue producido y vendido por algunos grandes terratenientes especializados. Existía una gran necesidad de semillas mejoradas de muchas especies, no solo saludables y de buena calidad, sino también genéticamente mejoradas para diversas características. El fitomejoramiento comenzó en Europa durante el siglo XIX y muchas pequeñas empresas crecieron, ya sea con apoyo estatal o como empresas familiares. Durante el siglo XX, el desarrollo continuó y se iniciaron una gran cantidad de empresas en todo el mundo, pero también se llevó a cabo el fitomejoramiento en universidades e institutos gubernamentales. El desarrollo en los últimos 50 años ha sido muy acelerado. Una serie de grandes empresas que operan en el mercado global se han fusionado y se han vuelto aún más grandes, adquiriendo empresas y propiedades cruzadas convirtiendo la realidad del fitomejoramiento de empresas en un mapa conceptual cada vez más complicado. Las compañías agroquímicas mundiales han complementado sus operaciones originales con fitomejoramiento y semillas, mientras que las compañías farmacéuticas y energéticas han abandonado este mercado. Han surgido nuevas empresas que se han centrado en la biotecnología en los últimos años, y han sido adquiridas gradualmente por las empresas multinacionales. En Europa, sin embargo, siguen existiendo varias empresas de fitomejoramiento más tradicionales, pequeñas o medianas, y algunas con apoyo estatal. Pero la tendencia es que las grandes compañías multinacionales de biotecnología vegetal

abandonan Europa y establecen esa parte de sus operaciones en otros países, producto principalmente de la resistencia política y las complicadas y costosas regulaciones en la Unión Europea.

4.1. Fitomejoramiento en Europa

El fitomejoramiento tiene una larga historia en Europa. Al contrario de lo que fue el caso en los Estados Unidos de Norteamérica, las empresas privadas fueron muy activas desde un principio. En Francia, Vilmorin SA se inició como una "tienda de semillas" ya en el año 1742. En Alemania, se fundó Kleinwanzlebener Saatzucht (KWS) en el año 1856 y a principios del año 1900, se establecieron en Europa muchas empresas de semillas pequeñas y grandes. Al mismo tiempo, la participación del gobierno fue significativa. En Inglaterra, el John Innes Centre se fundó en el año 1910 y el Plant Breeding Institute (PBI) en el año 1912. En Alemania, el Max Planck für Pflanzenzüchtungsforschung se inició en el año 1928 y en Francia INRA (Instituto Nacional de Investigación Agrícola) fue fundada en el año 1946. Desde el principio, todas las organizaciones estuvieron fuertemente involucradas en fitomejoramiento. Varios de los actores mundiales en el fitomejoramiento de hoy tienen sus raíces en Europa.

En Alemania, KWS es una de las compañías líderes de semillas y mejora genética de vegetales en el mundo. La remolacha azucarera es el cultivo más importante, pero el maíz, el centeno, el trigo, la cebada, los girasoles, la colza y las papas también se han mejorado con éxito. KWS ha crecido a través de adquisiciones y nuevas filiales dirigidas a los mercados del norte de África, Oriente Medio, China y América Latina. Además de KWS, hay una serie de compañías de fitomejoramiento medianas y pequeñas en Alemania. Algunas de esas empresas colaboran en la comercialización de variedades a través de SaatenUnion.

En Francia, una parte importante del negocio de fitomejoramiento es propiedad de varias cooperativas agrícolas. Limagrain se fundó en el año 1965 para el fitomejoramiento de maíz, pero desde entonces ha adquirido una gran cantidad de empresas francesas y extranjeras como Vilmorin (1975) y Nickerson Seed (1990), y ahora es uno de los líderes del mercado de cereales en Europa. Junto con KWS, se formó la compañía estadounidense AgReliant (año 2000) para desarrollar y comercializar variedades de maíz y soya en los Estados Unidos de Norteamérica.

Limagrain ha continuado creciendo a través de adquisiciones corporativas de, entre otras, Advanta y Mikado Seed Grower en Japón y media docena de compañías más pequeñas en los Estados Unidos de Norteamérica, Bélgica, Francia, Australia y Brasil, así como dos compañías de la India y una estadounidense para hortalizas. En el año 2006, se llegó a un acuerdo de cooperación con Longping High-Tech en China, líder mundial en el procesamiento de arroz híbrido. En la actualidad, Limagrain y KWS, junto con Bayer, Corteva, ChemChina/Syngenta y BASF son las compañías de semillas y fitomejoramiento más grandes del mundo.

Alrededor de otras 70 empresas de fitomejoramiento de diferentes tamaños operan en Francia. Empresas conocidas con propietarios franceses son Florimond Desprez, Euralis y Semences de France.

El fitomejoramiento en el Reino Unido está dominado por empresas internacionales, ya que muchas empresas británicas fueron adquiridas en el momento en que Shell asumió el control del PBI en la década de los años 70.

Los Países Bajos tienen una larga tradición en fitomejoramiento, pero muchas empresas forman parte ahora de grupos internacionales, especialmente empresas que mejoran y producen semillas de hortalizas. Dos empresas de este sector, con propietarios holandeses, son Enza Zaden y Bejo Zaden. Las empresas Agrico y HZPC son líderes a nivel mundial en la mejora genética y producción de semillas-tubérculo de papa.

España e Italia, así como Europa del Este, carecen de compañías grandes de fitomejoramiento de propiedad nacional. Tradicionalmente, el fitomejoramiento se ha desarrollado principalmente en instituciones estatales, complementado por empresas internacionales establecidas en estos países.

Fitomejoramiento en los países nórdicos

El fitomejoramiento en los países nórdicos tiene diferentes propietarios y el desarrollo de la investigación en esta área tiene en muchos casos apoyo estatal. En Suecia, la empresa Lantmännen AB (anteriormente Svalöf Weibull AB y SW Seed) de propiedad de los agricultores es la responsable del cultivo de plantas agrícolas para todo el país, incluidos los "cultivos no rentables". La misión de esta empresa es realizar el fitomejoramiento por motivos económicos comerciales, pero también el mejoramiento genético de cultivos con importancia para la sociedad, con el apoyo del estado y de los agricultores. Además, existen programas de fitomejoramiento financiados con fondos públicos focalizados en manzanas y papas y un pre-mejoramiento destinado a la cebada en la Sveriges lantbruksuniversitet (SLU, Universidad de Ciencias Agrícolas de Suecia). Por otra parte, Nomad Food es una compañía líder en verduras congeladas bajo la marca Findus y comercializa sus propias variedades para alimentos enlatados en Suecia y en el extranjero.

En Noruega, la empresa Graminor AS realiza el fitomejoramiento –que incluye a la mayoría de los cultivos, por ejemplo, cereales, forrajeras, papas, frutas y bayas– y tiene al estado noruego y la cooperativa agrícola Felleskjöpet como sus propietarios. También Existe un apoyo estatal para el pre-mejoramiento de especies vegetales de interés. Finlandia tiene una organización similar con la empresa Boreal Plant Breeding Ltd., que es responsable del fitomejoramiento de cultivos agrícolas principalmente para su propio mercado, y teniendo al estado finlandés como propietario mayoritario. El estado finlandés apoya el fitomejoramiento de cultivos menores pero que son importantes para la sociedad.

En Dinamarca, las empresas privadas están a cargo de todo el fitomejoramiento. DLF Trifolium (propiedad de los productores de semillas daneses) es un líder mundial en el fitomejoramiento, producción y comercialización de plantas forrajeras (gramíneas, principalmente ryegrass y trébol) y de césped. La remolacha azucarera es una nueva parte de la compañía a través de la adquisición de Hilleshög en Suecia. Las dos compañías más pequeñas, Sejet Planting y Nordic Seed, ambas son propiedad de diferentes cooperativas agrícolas, compiten en el desarrollo de variedades de cebada y trigo, principalmente en Dinamarca y sus alrededores. La empresa Danespo también se dedica al mejoramiento genético de la papa.

El fitomejoramiento en Islandia está financiado con fondos estatales para la Landbúnaðarháskóli Íslands (Universidad Islandesa de Agricultura) y se enfoca en cebada y forrajeras.

4.2. Fitomejoramiento en los Estados Unidos de Norteamérica

Hasta la década de los años 30 del siglo pasado, el fitomejoramiento y la investigación en los Estados Unidos de Norteamérica se realizaban principalmente en las estaciones experimentales agrícolas del estado norteamericano, es decir, en las Estaciones de Investigación Agrícola del USDA y en algunas empresas privadas. Con la introducción del maíz híbrido y la formación de la empresa Pioneer Hi-Bred Corn Company en el año 1926, surgieron varias empresas privadas. Además de unas pocas compañías grandes, la mayoría de los casos eran pequeñas empresas familiares que producían y vendían maíz híbrido producto de líneas desarrolladas en institutos gubernamentales y estaciones experimentales del USDA o de las universidades estatales norteamericanas. La legislación de la Protección de Variedades Vegetales (PVP) del año 1970 aumentó rápidamente el interés privado por el fitomejoramiento. La decisión de la Corte Suprema de los Estados Unidos de Norteamérica del año 1980, de que la materia viva puede ser patentada, estimuló aún más el fitomejoramiento desarrollado por las compañías privadas. Esto condujo a grandes inversiones del sector privado, especialmente en el mejoramiento genético de la soya. A principios del año 1990, las inversiones del sector privado en fitomejoramiento e investigación fueron dos veces mayores que las del estado.

La empresa Pioneer Hi-Bred, que durante mucho tiempo fue la compañía dominante de mejoramiento genético de maíz, enfrentó la competencia principalmente de la empresa DeKalb AgResearch Inc. En el año 1972, las dos compañías tenían cada

una el 22 por ciento del mercado de maíz híbrido. Al mismo tiempo, ambas compañías comenzaron a comprar empresas familiares más pequeñas y este proceso se aceleró cuando se hizo evidente que la biotecnología vegetal sería una importante herramienta para el fitomejoramiento práctico. Varias compañías químicas y farmacéuticas, Royal/Dutch Shell, DuPont, ICI, Ciba-Geigy, Sandoz, Union Carbide, Upjohn y Pfizer, se interesaron en el fitomejoramiento y pronto adquirieron unas cincuenta empresas.

Monsanto produjo su primera planta transgénica en el año 1982 y probó un cultivo genéticamente modificado (GM) en el campo en el año 1987. En el año 1998, Monsanto se convirtió en la cuarta empresa de semillas a nivel mundial.

4.3. Canadá y América Latina

En Canadá y América Latina, las principales compañías líderes son responsables de suministrar semillas de cultivos que ahora se venden como OGM en estos países, es decir, maíz, soya y colza. A través de sus filiales también tienen una gran parte del mercado de hortalizas. El fitomejoramiento de otros cultivos, por ejemplo, cereales, se realiza en gran medida en instituciones estatales como AgCanada o los INIAs en Latinoamérica. En Brasil, Embrapa es otra importante institución estatal, pero en este país también existen compañías privadas de fitomejoramiento y producción de semillas que juegan un rol papel en sus respectivos mercados. El capítulo 9 describe en detalle el fitomejoramiento en América Latina.

4.4. Asia

La Revolución Verde cambió el panorama de la agricultura asiática con las variedades semi-enanas de arroz y trigo harinero, que hoy se cultivan en varios millones de hectáreas en el mundo. Como resultado de su uso, junto a la aplicación de fertilizantes, riego y otras tecnologías modernas, la cosecha de granos se triplicó en menos de medio siglo. Hoy en día, una industria dinámica de semillas promueve en Asia y el Pacífico la producción y comercialización de semillas de calidad de nuevas variedades de cereales, legumbres, cultivos oleaginosos y de fibra, y hortalizas. La mayor parte del sector privado de semillas de Asia, con muchas empresas que tienen su propio programa de fitomejoramiento, se basa en un modelo comercial centrado en los pequeños y medianos propietarios. Estas compañías de semillas venden principalmente paquetes de semillas cuyos tamaños se enfocan a las necesidades de los pequeños agricultores. La mayoría de las empresas de semillas utilizan significativamente el germoplasma mejorado genéticamente por el CGIAR, o los programas de fitomejoramiento de los institutos nacionales de investigación, así como de los bancos de germoplasma.

4.5. África

Hay dos centros principales de diversidad de cultivos en África: uno en Abisinia, en el Cuerno de África y el otro en África Occidental. Los cereales como el mijo, el sorgo y el tef, una verdura como la okra, especies del género *Ensete* (cultivos relacionados con el plátano), un cultivo oleaginoso como el ricino y el café son originarios de Etiopía.

El Fondo Internacional de las Naciones Unidas para el Desarrollo de la Agricultura (FIDA) declaró que el crecimiento de la agricultura es fundamental para reducir la pobreza en África subsahariana. Más del 70% de los pobres de África dependen de la agricultura para su subsistencia. Los principales impactos del fitomejoramiento se derivaron de los programas de mejoramiento del Instituto Internacional de Agricultura Tropical (IITA) del CGIAR con sede en Ibadan (Nigeria). Los agricultores africanos que cultivan semillas mejoradas genéticamente por IITA y sus socios nacionales se benefician de los aumentos de rendimiento en cereales como el maíz, las leguminosas de grano, como el caupí o la soya, los cultivos de raíces y tubérculos como la yuca y el ñame, o las frutas como el plátano o los bananos de cocción del África Oriental.

El sector privado de semillas está evolucionando rápidamente en África. Las empresas grandes, medianas y pequeñas que se originan en África Oriental o Meridional tienen fuertes canales de distribución y programas de adopción que ayudan a los pequeños agricultores al proporcionar semillas de variedades recién cosechados de cereales, legumbres de grano y verduras. El maíz domina la mejora del sector privado, pero también hay inversiones en la mejora de frijoles secos, soya y tomate. Las pequeñas y medianas empresas de semillas de África oriental y meridional dependen del germoplasma reproducido de los Centros CGIAR y del World Vegetable Center (AVRDC) para obtener materiales parentales y líneas de reproducción avanzadas. El sector privado se dedica a la producción de semillas en África oriental y meridional.

4.6. Desarrollo global hasta el año 2015

La tecnología genética afectó la reestructuración de la industria de semillas. En el año 2000, Monsanto se fusionó con Pharmacia/Upjohn y, por lo tanto, dejó de existir, pero Pharmacia formó una nueva subsidiaria del mismo nombre. En este "nuevo Monsanto", se estableció el antiguo negocio agrícola de Monsanto, pero el negocio farmacéutico se mantuvo dentro de Pharmacia.

En el año 2005, Monsanto adquirió la empresa de semillas de hortalizas más grande del mundo, Seminis, y en el año 2007, compró la empresa Delta and Pine Land Company, líder en el cultivo de plantas de algodón. Al año siguiente, obtuvo la compañía holandesa de semillas de hortalizas para jardín De Ruiter Seeds. Después de estas adquisiciones, Monsanto se hizo significativamente más grande que la empresa DuPont/Pioneer HiBred. Casi al mismo tiempo, Monsanto cerró su programa de fitomejoramiento de cereales en Europa. En la primavera del año 2013, anunció el retiro de todas sus solicitudes de aprobación de variedades GM para su uso en Europa.

Pioneer HiBred, que era la compañía más grande de maíz híbrido desde el año 1980, comenzó a comercializar variedades de girasol en los Estados Unidos de Norteamérica en el año 1986. En los años siguientes, comenzaron con el mejoramiento genético de arroz híbrido en India y colza, y se convirtió en la compañía de semillas de soya más grande en los Estados Unidos de Norteamérica, y comenzó el proyecto "genómica del maíz".

Monsanto estuvo atrasado en el desarrollo de la biotecnología vegetal hasta que las empresas DuPont y Pioneer HiBred se fusionaron en el año 1999. DuPont tenía una fuerte investigación en biotecnología y Pioneer HiBred se convirtió en la compañía de semillas más grande del mundo, seguida por Monsanto y Syngenta.

Si bien Monsanto había crecido a través de las adquisiciones y fusiones de empresas, Pioneer HiBred lo había hecho principalmente a través del desarrollo continuo de sus propias operaciones. Pioneer HiBred todavía dependía en gran medida de algunas de las patentes de Monsanto, pero había invertido mucho para aumentar su independencia.

Una compañía que había tenido una gran influencia en el mercado mundial de semillas fue la compañía farmacéutica suiza Sandoz AG. Syngenta, que heredó muchas de las compañías de Sandoz/Northrup King, compró en el año 2004 las compañías norteamericanas de semillas de maíz y soya, Garst Seed y Golden Harvest. En los años siguientes, logró varios acuerdos de cooperación con Dow, Monsanto, Pioneer HiBred, CIMMYT (centro del CGIAR para el fitomejoramiento en maíz y trigo) y EMBRAPA.

La empresa química y farmacéutica alemana Bayer desarrolló una fuerte posición en biotecnología vegetal y semillas. El crecimiento logrado mediante la adquisición de varias empresas en Europa, América del Norte y del Sur y, en los últimos años, con operaciones en Asia y Australia, le permitió a Bayer tener programas de fitomejoramiento para hortalizas, cultivos oleaginosos, algodón y, posteriormente, en arroz y trigo.

BASF, la compañía química líder a nivel mundial, realizó una importante inversión en biotecnología vegetal desde finales de los años noventa. En el año 1999, se convirtió en copropietarios de

la compañía sueca Svalöf Weibull AB, pero en lugar de comprar más compañías de fitomejoramiento y de semillas, establecieron acuerdos de asociación con otras para comercializar las características y transgenes desarrollados a través de su propia investigación. Dow AgroSciences, otra gran empresa de fitomejoramiento y de semillas, tenía su base en un amplio negocio de productos agroquímicos. Su atención se centró en el mejoramiento transgénico para resistencia a los insectos en el maíz. Otra área en la que Dow se enfocó fue en los aceites vegetales más saludables.

Arcadia Biosciences es una empresa estadounidense de biotecnología vegetal de tamaño mediano que desarrolla cultivos transgénicos para aumentar la eficiencia del nitrógeno, la tolerancia a la sequía y la tolerancia a la sal. La compañía fue fundada por un filántropo con ambiciones ambientales y tiene como objetivo la colaboración con las grandes compañías multinacionales, así como con China e India.

4.7. Concentración continua después del año 2015

Durante los últimos años, los cambios estructurales han continuado entre los grandes grupos agroquímicos. Comenzó con el anuncio de una fusión entre Dow y DuPont en diciembre del año 2015. La nueva compañía, llamada DowDuPont, era en ese momento la compañía más grande que se había unido con relación a química agrícola y semillas. Dado que las dos compañías Dow y DuPont tenían principalmente actividades complementarias, las autoridades de antimonopolio en los Estados Unidos de Norteamérica y la Unión Europea no presentaron reclamos sobre la venta de partes de la nueva empresa. La facturación de DowDuPont (hoy Corteva) se estimó en US$ 14 mil millones para el año 2017.

En febrero del año 2016, la empresa estatal china ChemChina hizo una oferta por Syngenta, que fue aceptada. Después de la venta de parte de la actividad de pesticidas, el acuerdo se completó en la primavera del año 2017. Históricamente, ChemChina no había invertido grandes sumas en I + D, sino que principalmente se dedicaba a producir pesticidas genéricos. La adquisición de Syngenta fue un acuerdo estratégico para garantizar la seguridad alimentaria de China mediante la compra de tecnología líder y contribuyendo a su utilización en China y otras partes del mundo.

En septiembre del año 2016, quedó claro que Bayer compró Monsanto para ser la compañía más grande en agroquímicos y semillas a nivel mundial. El acuerdo se cerró en la primavera del año 2018, después de que Bayer vendió gran parte de su biotecnología vegetal, fitomejoramiento y semillas a BASF. La facturación total de Bayer se estimó en US$ 23 mil millones para el año 2017.

Mediante la adquisición de los negocios que Bayer se vio obligado a desinvertir por las autoridades antimonopolios de Estados Unidos de Norteamérica y la Unión Europea, BASF se ha convertido en una compañía significativamente importante en el mejoramiento genético de cultivos y producción de semillas, pero aún es más pequeña que las otras tres compañías más grandes; Bayer, Corteva y ChemChina/Syngenta. BASF tiene operaciones en el fitomejoramiento y producción de semillas de colza, soya, algodón y hortalizas, además de I + D para el desarrollo de trigo híbrido. BASF, Limagrain y KWS presentan aproximadamente el mismo tamaño en los mercados de fitomejoramiento y semillas a nivel mundial. Pero para BASF, tiene una inversión más grande I+D de biotecnología vegetal y en agroquímicos.

Figura 4.1. *El desarrollo de la industria internacional de fitomejoramiento ha venido concentrándose rápidamente en los últimos años. El mapa es muy complejo con muchos cambios de propiedad, la adquisición de empresas más pequeñas, la propiedad cruzada y la concesión de licencias.*

4.8. ¿Continuará la concentración?

La primera ola de entrada en los mercados de fitomejoramiento y semillas se produjo con compañías energéticas y farmacéuticas durante el año 1970 por el aumento de los precios del petróleo y del trigo. Después de algunos años, muchos de estos habían terminado con sus intereses en la industria de semillas, pero otros permanecieron como las compañías Ciba-Geigy y Sandoz, que posteriormente se unieron en Syngenta. A mediados y finales del año 1990, la próxima ola llegó cuando las compañías químicas y farmacéuticas en los Estados Unidos de Norteamérica y la Unión Europea compraron compañías de fitomejoramiento para obtener rápidamente acceso a los conocimientos, los materiales y los mercados. Hoy, esto ya no es una alta prioridad. La industria farmacéutica ha abandonado este campo para no asociarse con plantas de OGM para su mayor desarrollo de productos farmacéuticos que utilizan las mismas tecnologías. Las adquisiciones de negocios ahora tienen lugar principalmente por razones estratégicas o porque una empresa quiere establecerse en el mercado de una nueva región. Sin embargo, todavía hay un interés para las compañías de investigación con una tecnología o producto que ofrecer. Durante los últimos años, se ha implementado una nueva tendencia de consolidación en la agroindustria, no solo en agroquímicos y semillas, sino también en otros segmentos, no solo en las partes relacionadas con tractores, maquinaria y otros equipos, sino también en el mejoramiento genético de ganado.

La característica particular de los últimos veinte años es la colaboración entre las grandes compañías con una amplia gama de licencias cruzadas y proyectos, y esta tendencia continúa. Al mismo tiempo, existe una mayor conciencia de que la investigación científica de alto nivel es difícil de realizarse en una sola empresa y, por lo tanto, los proyectos de I+D se inician en colaboración con instituciones universitarias, o se brinda apoyo financiero, para dichos proyectos. Se otorga financiamiento para la capacitación de los fitomejoradores, ya sea a través de subvenciones o donaciones a las universidades. Existe una opinión cada vez mayor de que compañías privadas e instituciones públicas, deben trabajar juntas para lograr el

objetivo de producir suficientes alimentos para una población mundial en crecimiento.

En el año 1994, había 326 empresas privadas de fitomejoramiento en los Estados Unidos de Norteamérica. La mitad de todos los fitomejoradores estaban empleados en 35 empresas con 10 o más empleados. La otra mitad estaba empleada en 291 empresas con 9 empleados o menos. Hoy en día, hay media docena de grandes compañías mundiales de fitomejoramiento y alrededor de 150 compañías independientes de fitomejoramiento y semillas. En el fitomejoramiento de maíz, soya y algodón, prácticamente todos dependen del acceso a transgenes a través de licencias, principalmente de Bayer y Corteva. En el año 2009, se estimó que las cuatro compañías de semillas más grandes tenían más del 50 por ciento del mercado global. Es aproximadamente la misma cifra que para los productos químicos agrícolas. Igualmente, se espera que la mayoría de los productores, independientemente de dónde operen, puedan elegir entre cultivos de, al menos, 3 a 4 compañías de semillas diferentes. En Europa, el número de compañías de semillas sigue siendo grande, con muchas opciones.

Esta concentración de empresas significa que menos compañías suministran semillas a los agricultores. Esto también significa que menos empresas son responsables de las innovaciones que impulsan el desarrollo. En el año 2010, las ocho compañías de semillas más grandes representaron el 76 por ciento de todos los gastos de investigación y desarrollo (I + D) en la industria de semillas, con un enfoque en los cultivos donde se utiliza la tecnología transgénica principalmente en maíz, soya y algodón. Con una mayor protección de la propiedad intelectual en forma de derechos y patentes de los obtentores de plantas, y menos compañías competidoras, uno puede temer que las compañías aumenten sus márgenes. Las empresas argumentan que los aumentos de precios han sido necesarios para cubrir el alza de los costos y para invertir en I + D. Las grandes empresas son conscientes del problema y se han hecho varias propuestas sobre cómo poner a disposición las tecnologías, que son necesarias para que los propios países en desarrollo potencien la investigación el desarrollo de productos (es decir, tecnologías habilitadoras). Estos aspectos se analizan con más detalle en el Capítulo 9.

5. LA PROPIEDAD INTELECTUAL, LOS DERECHOS DE OBTENTOR Y LAS PATENTES

Las discusiones relacionadas con la propiedad intelectual de los recursos fitogenéticos y sus resultados de investigación se han complicado cada vez más. No es una situación fácil, ni siquiera para los expertos, saber qué es aplicable y cómo interactúan en las distintas regulaciones de los países. A continuación, se entrega una descripción altamente simplificada que no pretende ser exhaustiva.

5.1. Ley de Propiedad Intelectual

Los derechos de autor de las obras literarias y artísticas, de las patentes y de los derechos de obtentor son términos comunes de los llamados derechos de propiedad intelectual. El titular de estos derechos de autor tiene la exclusividad de explotar comercialmente un determinado logro intelectual durante un período limitado de tiempo. Una patente es generalmente válida por un periodo de 20 años, mientras que un derecho por una variedad vegetal de un cultivo determinado es válido por, al menos, 15 años. Para el caso de los frutales y árboles por al menos 18 años, lo que varía levemente según cada legislación nacional. A diferencia de lo anterior, se otorga una protección extrema a los derechos de autor sobre obras de arte, literarias, musicales o visuales, que son válidas hasta 70 años después de la muerte del autor. El derecho de autor otorga al titular el derecho exclusivo de utilizar una obra, pero también el derecho a oponerse a que la obra se modifique o se ponga a disposición de una manera que vulnere la reputación o el carácter distintivo del autor.

El propósito de un derecho de propiedad intelectual es dar protección al titular contra plagio y copias para que pueda ser reembolsado por el trabajo o logro intelectual que condujo a la protección. La llamada “piratería” intelectual es cuando se copia música y películas, y luego se hace disponibles o se vende a terceros.

Se considera que la ley de patentes más antigua del mundo se deriva de la legislación emitida a fines del siglo XV, que otorgó a los artesanos en Venecia los derechos propios de cualquier herramienta nueva que no estaba disponible en el pasado. El sistema de patentes moderno tiene su origen en el siglo XVII en Inglaterra, de donde se diseminó a otros países. El acuerdo internacional básico sobre derecho de propiedad industrial se acordó en París en el año 1883.

El propósito de las patentes es promover el desarrollo industrial de la sociedad a través de un derecho exclusivo limitado en el tiempo. A cambio, la invención tiene que ser descrita para que otras empresas e inventores puedan usar este conocimiento en su trabajo. Para que una invención sea patentable, debe ser una novedad y proporcionar una solución a un problema técnico. Los descubrimientos que ya existen en la naturaleza no pueden ser patentados. En general, el descubrimiento de los genes Bt no es en sí mismo patentable, sino la tecnología usada, con la finalidad de transferir un gen Bt específico a una especie vegetal que le otorgue resistencia a un insecto específico.

El derecho de patentes es nacional, lo que significa que, por ejemplo, una patente sobre un gen Bt específico en algodón, con un efecto sobre un daño de lesión específico, sólo se puede aplicar en los países en los que se ha solicitado y concedido esa patente.

5.2. Los derechos de obtentor

A medida que el fitomejoramiento creció en el siglo XX, se discutió cómo los fitomejoradores profesionales o las compañías que producían nuevas variedades mejoradas podían obtener compensación por el trabajo de su creación. Inicialmente, se utilizaron marcas, es decir, utilizando el nombre de su empresa para identificar sus cultivos, por ejemplo, Weibull (una empresa sueca). Eventualmente, se hizo posible cobrar una pequeña cuota de dinero por un control de calidad del estado y la certificación de la semilla. Al mismo tiempo, era obvio que el sistema de patentes no se ajustaba a los vegetales. La Convención sobre los derechos de las obtenciones de vegetales, o sea, la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UPOV), entró en vigor en el año 1961 tras varios años de negociaciones.

Los derechos de los obtentores vegetales corresponden a un tipo de propiedad intelectual, que permite a los obtentores de nuevas variedades vegetales protegerlas de la misma manera que un inventor protege un nuevo invento con una patente. El derecho de obtentor autoriza al propietario a utilizar una variedad protegida de cultivos, al menos 15 años, dependiendo de la especie vegetal y de la legislación de cada país, siempre que se pague la cuota anual por su protección. Sólo el obtentor tiene derecho a reproducir, procesar, vender, importar y exportar semillas de esa variedad vegetal. Nadie más puede mantener la variedad con el propósito de multiplicarla. Cualquiera que tenga derechos de una variedad vegetal puede cobrar a otros por su uso comercial. Esto se utiliza, por ejemplo, para licenciar variedades a representantes de otros países, o a compañías que multipliquen y vendan semillas.

Las variedades protegidas por los derechos de obtención vegetal pueden ser libremente utilizadas para la investigación, en experimentos y como progenitores de nuevas variedades – incluso por los competidores. Esta es una diferencia importante en comparación con las patentes. Los derechos de obtentor, al igual que el derecho nacional de patentes, son nacionales y los derechos de las variedades vegetales sólo se aplican en ese país. Desde el año 1994, después de la última revisión de la UPOV 1991 se ha solicitado los derechos de obtención vegetal en toda la Unión Europea. Uno puede obtener el derecho de variedad vegetal para las variedades en todas las especies de plantas cultivadas, también para las variedades híbridas.

Para que una variedad sea protegida debe demostrarse que es: Nueva, Distinta, Uniforme y Estable genéticamente entre generaciones. Durante la evaluación, la nueva variedad se examina detalladamente, principalmente en términos morfológicos, en contraste con las otras variedades existentes de la misma especie. Esta evaluación es conocida como DUS (siglas en inglés: Distinctness, Uniformity and Stability) o DHE (siglas en español: Distinta, Homogénea y estable).

La novedad de la variedad y el cumplimiento de los criterios exigidos en la evaluación DUS o DHE permite que la variedad pueda ser inscrita en el registro nacional de variedades protegidas de un país. Adicionalmente, en muchos países es obligatoria la evaluación agronómica de las variedades y solo aquellas variedades con desempeño destacado demostrado pueden ser inscritas en el registro de variedades y posteriormente comercializadas. Tal es el caso de la Unión Europea en que se debe incluir en una lista nacional o en otro Estado miembro de la Unión Europea. Por ejemplo, para ingresar en la lista sueca, la variedad debe haber sido probada en ensayos oficiales durante al menos dos años y ser mejor que otras variedades incluidas en la lista nacional para cualquier característica importante, como son el rendimiento, la resistencia a enfermedades o alguna calidad específica. Las variedades antiguas que ya no están protegidas por los derechos de obtentor vegetal o que ya no figuren en una lista nacional, pueden estar en otra lista especial de conservación sin una tasa anual, lo que permite vender las semillas certificadas de esas variedades antiguas. La evaluación correspondiente del valor de la variedad no es necesaria para los cultivos hortícolas. Se han presentado propuestas para una nueva legislación sobre semillas para la Unión Europea, pero se retiraron en la primavera del año 2014, después de varias manifestaciones debido a que se imponían los mismos requisitos para los cultivos hortícolas que los usados para los cultivos agrícolas.

Una variedad pueda ser protegida, si es que no ha sido vendida o utilizada con fines comerciales, por más de un año en el país antes de que se haya presentado la solicitud de derecho de obtención vegetal, o cuatro años en cualquier otro país. Para que la variedad sea protegida, debe tener el nombre de aprobado. Esta normativa es común en los países que han adherido a la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UPOV).

Según la UPOV (1991), los países que ratificaron (aprobaron) la Convención tienen la oportunidad de otorgar a los agricultores un “privilegio” importante para las variedades nacionales protegidas en la mayoría de los cultivos agrícolas. Este “privilegio” consiste en que el agricultor puede ahorrar una parte de su cosecha de variedades protegidas para utilizarla como semilla en su propio campo (finca), pero sin venderla ni distribuirla a otros. Este derecho se aplica a la mayoría de los cultivos agrícolas, con la excepción de las variedades híbridas y las sintéticas.

Para que el propietario sea parcialmente compensado, cuando los agricultores recolectan las semillas de sus propios cultivos, el derecho de obtentor en la Unión Europea permite que el propietario cobre por una semilla almacenada en la finca. Los agricultores de la Unión Europea que cultivan pequeñas superficies – menos de 20 hectáreas de cultivos de cereales y oleaginosas – están exentos y pueden tomar libremente semillas cultivadas en sus fincas. Los que siembran en zonas más extensas son responsables de pagos de compensación. La legislación de la Unión Europea dice que el pago de compensación debe ser razonable pero significativamente inferior al aplicable a las semillas comerciales. Sin embargo, no existe una legislación que obligue a los agricultores a proporcionar información sobre las variedades y el tamaño de las áreas cultivadas. En Suecia, por ejemplo, esto se ha resuelto mediante un acuerdo entre las empresas de la industria y las organizaciones agrícolas basado en el registro voluntario de datos y en un nivel de regalías de aproximadamente 70% de lo normal. Se ha estimado que se paga regalías entre el 70% y el 80% por las semillas cultivadas en Suecia.

La mayoría de los países de la Unión Europa todavía carecen de un sistema operativo para recaudar regalías sobre semillas producidas. En la mayoría de los otros países que han firmado la UPOV, como en los Estados Unidos de Norteamérica, Canadá, Argentina, Brasil y Chile, entre otros, los agricultores pueden utilizar sus propias semillas sin pagar ninguna compensación por ello.

En el actual derecho de obtentor (Acta UPOV 1991), se han introducido un par de párrafos que tratan de la adaptación a la evolución de la biotecnología vegetal. El más importante es el término “Variedades Esencialmente Derivadas”. Lo anterior significa que se ha producido una nueva variedad cambiando sólo un gen específico en una variedad protegida usando las herramientas de la biotecnología vegetal; por ejemplo,

añadiendo un gen para una característica como la resistencia a un patógeno, sin que se modifique la variedad protegida. En tal caso, se requiere el permiso del dueño de la variedad protegida original para explotar los derechos asociados con el registro del derecho de obtención vegetal para la nueva variedad. Esto significa, por lo tanto, que si un gen específico, tal como un gen Bt para la resistencia a un daño de lesión particular, se introduce en una variedad protegida por derechos de obtención vegetal que todavía son válidos, entonces el propietario de la variedad original puede requerir una compensación.

5.3. Patentes

Desde el año 1930 ha sido posible obtener patentes de variedades vegetales en los Estados Unidos de Norteamérica, en especies que se propagan vegetativamente (incluyendo injertos) según una ley particular. Pese a ello, la protección no fue tan fuerte como para otras patentes. En el año 1980, los Estados Unidos de Norteamérica recibieron un derecho de obtentor basado en la UPOV, pero en el año 1985 un fallo judicial permitió solicitar patentes sobre especies de plantas siempre y cuando cumplieran con los requisitos de utilidad e invención, lo que implicaba que la invención era diferente de todo lo que se conocía hasta entonces. Aquello propició amplios debates en relación con la revisión de la UPOV del año 1991, la cual dio lugar a la apertura del Convenio revisando la protección de variedades con los derechos de obtención vegetal. Esto significa, por lo tanto, que una variedad protegida por patentes en los Estados Unidos de Norteamérica sólo puede ser protegida por derechos de obtención vegetal en otros países.

Por un fallo icónico del Tribunal Supremo de Estados Unidos de Norteamérica en el año 1980, una solicitud de patente fue concedida sobre el uso de una bacteria genéticamente modificada para limpiar el derrame de petróleo. Esto permitía que otras bacterias modificadas podrían ser patentadas, por ejemplo, para la producción de sustancias farmacológicas específicas. Con el desarrollo de la biotecnología vegetal, también ha sido posible adquirir patentes sobre plantas que se basan en el uso de la biología molecular, no sólo en Estados Unidos de Norteamérica, sino en la gran mayoría de los países, particularmente miembros de la OCDE. Este hecho hizo posible patentar la introducción de genes para la tolerancia al herbicida glifosato en un cultivo particular o introducir genes para producir toxinas Bt, que entregan resistencia específica a una especie de insecto en particular, como el gorgojo del maíz.

Ya que la tecnología para la introducción de un gen específico se ha patentado en la gran mayoría de los países, la diferencia para la obtención de patentes de los Estados Unidos de Norteamérica y el resto del mundo ha disminuido. Por ejemplo, si permite la expresión de Bt en una variedad comercialmente protegida, la variedad puede ser protegida por patentes en los Estados Unidos de Norteamérica, pero sólo por los derechos de variedad vegetal en el resto del mundo. Sin embargo, el uso del gen Bt estará protegido por patentes en todo el mundo. Este es el tema de fondo de la gran parte de las críticas sobre los cultivos transgénicos por quienes están contra de ellos.

Las autoridades que regulan las patentes, especialmente en los Estados Unidos de Norteamérica, otorgaron en sus inicios patentes muy amplias. Un ejemplo, es la patente para la transformación de la colza, cuya propiedad intelectual fue obtenida por Monsanto –hoy parte de Bayer CropScience– al adquirir la compañía Calgene; que a su vez había patentado la tecnología utilizando Agrobacterium. Sin estas patentes, tan amplias, las oportunidades para Monsanto y otras grandes empresas de mantener su hegemonía en la biotecnología vegetal se hubiesen reducido. Las autoridades de patentes se han vuelto gradualmente más restrictivas, pero todavía existen casos de patentes otorgadas y que pueden ser cuestionadas. Una patente puede ser anulada en la corte, es decir, en la instancia superior, si solamente se trata de una breve mejora a lo que ya existe o se conoce. La violación de una patente otorgada para su explotación por otro inventor distinto, puede generar la paga de daños y una prohibición para el uso de este producto.

Esto ha causado disputas entre las grandes empresas biotecnológicas y otras más pequeñas, lo que ha desmotivado

la participación en el desarrollo y uso de la biotecnología vegetal moderna. En particular, Monsanto actuó agresivamente en defensa de las patentes controladas por su empresa. Por ejemplo, logró acuerdos legales para que los agricultores de Brasil paguen regalías por el cultivo de soya tolerante a herbicidas. Sin embargo, durante mucho tiempo, se aceptó que los agricultores argentinos no paguen por esta patente en sus cultivos de soyas transgénicas porque Monsanto no había solicitado una patente en Argentina cuando comenzó su cultivo en el país. En los últimos años, Monsanto llegó a un acuerdo con una serie de grandes agricultores en Argentina, quienes pagan una compensación por el uso de la soya tolerante al glifosato. Sin embargo, en el año 2021 Bayer descontinuó la venta de la soya Intacta (RR2) en Argentina debido al no pago de regalías por el resto de los agricultores.

Figura 5.1. *La patente de Monsanto sobre soya "Roundup ready" con resistencia a glifosato expiró en 2015. Fotografía: Wikimedia Commons.*

Tanto en los Estados Unidos de Norteamérica, como en Canadá, Monsanto introdujo un sistema que restringía a un agricultor, a través de un acuerdo especial, a no utilizar semillas de su propia cosecha de las variedades transgénicas tolerantes a herbicidas de colza y soya. El control de Monsanto al respecto ha sido muy estricto y en los casos descubiertos se han interpuesto demandas en las Cortes por daños y perjuicios. Un caso muy conocido es el proceso judicial contra Percy Schmeiser, un agricultor de colza en Canadá. En su alegato en la corte, Schmeiser, argumentó que su cultivo de colza tolerante a herbicidas fue consecuencia de que el polen de las plantas transgénicas de colza había sido transportado por el viento desde el campo de un vecino a su zona de cultivo. Los análisis posteriores mostraron que más del 95% de las plantas de colza del cultivo de Percy Schmeiser eran tolerantes a herbicidas, lo que difícilmente se puede explicar por la transferencia del polen foráneo a través del viento.

Este proceso judicial es un ejemplo del conflicto entre proteger el derecho del dueño de la patente a su invención o el privilegio del agricultor a usar su propia semilla. El proceso ha ido de un lado para otro en diferentes instancias judiciales y, de acuerdo con la última sentencia en el Tribunal Supremo en Canadá, se podría decir que ambas partes han recibido su parte del conflicto. Por una parte, la empresa Monsanto hizo valer su derecho de patente y, por otro lado, Schmeiser evito pagar una indemnización a Monsanto. En la Unión Europea, este proceso judicial no habría sido posible porque en el derecho de patentes de la Unión Europa existe una regla específica, es decir, existe el derecho de obtentor, así como también el derecho del agricultor, a usar semillas de variedades cosechadas en sus campos que contengan propiedades protegidas por patentes. Para que los dueños de las patentes sean elegibles para el reembolso de semillas, se requiere un sistema funcional de recaudación.

Aunque no es posible patentar los cultivos en Europa y el cultivo de variedades genéticamente modificadas (variedades GM) es muy limitado, los problemas de patentes también han tenido lugar. Esto se debe al hecho de que en Europa también es posible obtener patentes concedidas a plantas que han adquirido nuevas propiedades mediante un procedimiento técnico, como, por ejemplo, una variedad que presente una mutación específica. En un futuro próximo, también podemos esperar que las nuevas tecnologías de mejoramiento genético de vegetales, como el uso de la edición genética por CRISPR ("Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats", en español "Repeticiones Palindrómicas Cortas Agrupadas y Regularmente interespaciadas") proporcionen a las plantas, por ejemplo, una nueva resistencia, u otra característica, que pueda ser patentable. La tecnología CRISPR se asemeja a un bisturí molecular que permite la sustitución de secuencias de genes específicos. Al mismo tiempo, tenemos una situación en la que no está claro

qué tecnologías están cubiertas por la legislación obsoleta en materia de ingeniería genética en la Unión Europea.

Un par de solicitudes de patente de Dupont (hoy parte de Corteva), sobre semillas de colza, se están procesando en la Unión Europea, pero los fitomejoradores europeos han cuestionado el valor de estos productos. Se refiere, por un lado, al aceite de colza que se puede utilizar como aceite de freír o para reducir el procesamiento del aceite cuando se utiliza en la margarina de mesa. El otro caso, se refiere a un componente del sistema de producción de semilla híbrida de colza que la mayoría de los fitomejoradores desean usar. En ambos casos, estas solicitudes de patente han llevado a los productores europeos de semillas de colza a sentirse inseguros sobre su potencial para un fitomejoramiento óptimo. Por lo tanto, los fitomejoradores comerciales en Europa deben seguir de cerca lo que ocurre en el área de las patentes, y no sólo de los avances de la liberación de nuevas variedades protegidas por los derechos de obtención vegetal.

5.4. Otras convenciones internacionales

La complejidad del manejo y uso de la propiedad intelectual ha aumentado gradualmente para los fitomejoradores con el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), adoptado por la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente en Río de Janeiro en el año 1992, y el Acuerdo sobre los Aspectos de los Derechos de Propiedad Intelectual relacionados con el Comercio en el GATT (Acuerdo General sobre Aranceles Aduaneros y Comercio - GATT, por sus siglas en inglés, General Agreement on Tariffs and Trade) aprobado en el año 1994. La CDB protege a la biodiversidad, estableciendo que son los países los que poseen los recursos genéticos que existen naturalmente o en forma de las semillas tradicionalmente utilizadas en cada país. El Acuerdo sobre Aranceles Aduaneros y Comercio (GATT) establece que las variedades vegetales pueden quedar exentas de la posibilidad de patentar, pero en tales casos deben recibir otro tipo de protección por la propiedad intelectual, como el derecho de obtentor. Lo anterior, significa que muchos países, incluidos los países en desarrollo, se han adherido a UPOV (1991). Hoy, 77 países y organizaciones (por ejemplo, la Unión Europea) están afiliados a la UPOV. Aquí están incluidos, 39 países de Europa, 10 países de Asia, 17 países de América del Norte, Central y del Sur. De África, 5 países son miembros de la UPOV, pero también se incluye la Organización Africana de la Propiedad Intelectual, lo que facilita organizar un sistema adecuado de fitomejoramiento con 17 países africanos.

Figura 5.2. *Muchos acuerdos internacionales rigen la disponibilidad de recursos fitogenéticos, como el "Plan de acción mundial para la conservación y la utilización sostenible de los recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura con la Declaración de Leipzig" (1996), el "Tratado Internacional sobre los Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura" (2003) y el "Protocolo de Nagoya sobre el acceso a los recursos genéticos y la distribución justa y equitativa de los beneficios derivados de la utilización del Convenio sobre la Diversidad Biológica" (2010).*

El Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) propició que varios países en desarrollo, con importantes centros de diversidad genética de cultivos, exigieran una compensación por el acceso a los recursos genéticos de cada país. En la práctica, esto significa que las posibilidades de preservación de los recursos genéticos y de su investigación podrán ser severamente restringidas. Las negociaciones auspiciadas por la FAO (Organización de las Naciones Unidas) condujeron al Tratado Internacional de los Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura (TIRFAA), que dio lugar a un sistema multilateral para facilitar el acceso y uso de los recursos fitogenéticos en la agricultura, y para compartir los beneficios derivados por su utilización en un grupo de especies como se detalla en el Anexo I de este tratado.

A través de este sistema multilateral, los fitomejoradores pueden seguir utilizando las fuentes de genes de su interés, sin estar obligados a pagar por esos recursos genéticos, siempre que la explotación se refiera a los 60 cultivos y especies silvestres relacionados y enumerados en el anexo 1 del TIRFAA, y, además, que las variedades producidas utilizando este germoplasma del sistema multilateral estén disponibles, sin limitaciones. En consecuencia, una variedad, que está protegida por el derecho de obtentor, puede ser utilizada libremente por otros cultivadores para nuevos cruzamientos en un programa de fitomejoramiento. Si la explotación de los recursos genéticos resulta en la generación de patentes, se está obligado a compartir los beneficios obtenidos.

El Protocolo de Nagoya (del año 2010) constituye el mecanismo de la CDB para acceder a los recursos genéticos y para que las ganancias puedan ser devueltas a los países que poseen estos recursos genéticos. Según un reglamento de la Unión Europea, recientemente aprobado, es necesario que un obtentor de una nueva variedad demuestre cómo accedió a los recursos genéticos usados para generar esa variedad. Es necesario, además, una licencia del país que es actualmente el dueño del recurso genético usado y un acuerdo que demuestre que el recurso genético fue obtenido de un banco de germoplasma oficial, es decir uno que cuente con un estatus internacional. Para las universidades y los institutos dedicados al fitomejoramiento con fondos públicos o el pre-mejoramiento para ampliar la base genética de un programa de fitomejoramiento comercial, esto puede implicar mayores requisitos de documentación y más administración.

5.5. Acceso a los recursos genéticos

A menudo las diversas convenciones internacionales y la legislación nacional e internacional entran en conflicto. La situación puede ser comprensible cuando se discute internamente dentro de un país o en una convención, pero es incomprensible cuando varios países o convenciones se entrelazan. El fitomejoramiento comercial, sea transgénico o no, debe ser potenciado por las empresas que son compensadas por su trabajo interrumpido de la liberación de nuevas variedades con las características deseadas por los consumidores. Varias compañías reclaman sus derechos, mientras que muchas personas se oponen a la posibilidad de proteger la propiedad. Lo que raramente se indica es que no todas las plantas transgénicas y las patentes están necesariamente conectadas. Una gran mayoría de las plantas transgénicas producidas, especialmente aquellas financiadas con fondos públicos y desarrolladas para propósitos de investigación básica, no están patentadas ni están protegidas. En un futuro próximo, puede haber nuevas tecnologías, más eficientes y precisas, que podrían conducir a plantas patentables, pero que no sean clasificadas como transgénicas. Es difícil predecir hoy cómo, dónde y por quién(es) se desarrollará este aspecto. Es así que nos preguntamos: ¿Qué consecuencias tendría si se modificara la regulación de la tecnología transgénica en el fitomejoramiento por la Unión Europea?

La adopción del CDB es sólo uno de varios ejemplos de cómo los aspectos relacionados con el acceso y la utilización de los recursos genéticos se ha convertido en una parte importante de la agenda política internacional. Por lo tanto, preguntas sobre el manejo de la propiedad intelectual que conciernen al desarrollo de las ciencias biológicas y al suministro de alimentos desempeñan un papel cada vez más importante para la agricultura y la industria alimentaria.

6. RIESGOS: ¿REALES O POTENCIALES?

Las variedades vegetales obtenidas por transgenia, pueden dar una respuesta a los problemas de compleja solución del fitomejoramiento y ofrecen nuevas posibilidades productivas en relación a otros métodos alternativos. Estas variedades GM enfrentan situaciones legales complejas para poder ser utilizadas comercialmente, las que dependen del sistema legal imperante en cada país.

6.1. Leyes y reglamentos sobre plantas transgénicas

Las plantas transgénicas están sujetas a regulaciones estrictas dentro de la Unión Europea porque, cuando se desarrollaron inicialmente, existía un conocimiento muy limitado de los riesgos que podrían estar vinculados a esta tecnología. La base de la legislación europea es que todas las plantas que correspondan a la definición de una planta genéticamente modificada (o transgénica) deben evaluarse por su riesgo para la salud humana, el bienestar animal y el riesgo ambiental ecosistémico que pudieran tener. La evaluación del riesgo y la autorización para su siembra siguen tres protocolos diferentes: (1) el uso confinado o el manejo de plantas transgénicas en invernaderos o en laboratorios; (2) los ensayos de campo del cultivo transgénico al aire libre, en un lugar definido y durante un cierto período de tiempo, que se gestiona a nivel nacional, y; (3) la introducción comercial que requiere una aprobación general para el uso del cultivo transgénico dentro de la Unión Europea, que es gestionada de forma centralizada. Un pilar de la legislación es que se debe hacer una comparación con una variedad no modificada. Las autoridades nacionales llevan a cabo la evaluación y la aprobación de riesgos para uso confinado y ensayos de campo.

La aprobación de la variedad para su introducción al mercado se realiza a nivel de la Unión Europea, lo que significa que todos sus países miembros toman una decisión conjunta para toda la Unión Europea. La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) es responsable de la evaluación de riesgo y tiene en cuenta las opiniones de las autoridades competentes de los países miembros, el público y la literatura científica disponible y publicada. La Comisión de la Unión Europea hace entonces una propuesta para la toma de decisiones y los países miembros votan, a través de sus gobiernos, a favor o en contra de la aprobación. La normativa sólo abarca las plantas que entran dentro de la definición de una planta transgénica. Los riesgos con otras especies de plantas no son evaluados por ninguna autoridad, como ha sido señalado en muchos contextos por aquellos que sostienen que hay necesidad de una legislación general de bioseguridad en lugar de una legislación específica para plantas modificadas genéticamente o transgénicas. Un punto controversial, es aquel que se relaciona con la probabilidad de que ocurran cambios inesperados, es decir, que surjan eventos que no fueron planificados o predichos cuando se generó una planta genéticamente modificada. Además de los significativos recursos económicos invertidos en las pruebas de los riesgos potenciales de las plantas transgénicas para el medio ambiente y la salud humana o animal, este proceso de evaluación y concesión de licencias es muy costoso, tanto para los solicitantes como para las autoridades responsables. Las empresas de biotecnología vegetal afirman que sus costos para el proceso de concesión de licencias se estiman entre 10 y 20 millones de euros por producto genético registrado.

En la Unión Europea, la evaluación del riesgo es, por lo tanto, basada en la tecnología, es decir, sólo las plantas producidas por las técnicas definidas por la ley, como la ingeniería genética, tienen evaluaciones de riesgos para autorizar sus siembras. Otras variedades, no transgénicas, no se evalúan y no se requiere de condiciones especiales para su siembra y cultivo. En otras partes del mundo, hay regulaciones que se basan en otras razones. De acuerdo con la legislación de Canadá, por ejemplo, las plantas con “nuevas características” deben evaluarse independientemente de la tecnología utilizada para producirlas. Estas características pueden ser: (1) no encontrarse previamente entre las variedades cultivadas en Canadá y (2) tener un efecto sobre el medio

ambiente. La legislación de los EEUU y otros países es diferente y eligen otras formas de evaluación, pero, en general, la factibilidad de usar una variedad transgénica es difícil, costosa, impredecible y, a menudo, depende de decisiones motivadas políticamente en vez de un juicio basado en la evidencia científica.

6.2. ¿Cómo se evalúa un riesgo incierto?

Los riesgos se evalúan en varios contextos diferentes con la finalidad de respaldar la decisión de las autoridades de evitar consecuencias adversas para el ser humano, animales o el medio ambiente. Para los nuevos productos, como sustancias químicas, modelos de automóviles, productos farmacéuticos o cultivos transgénicos, las autoridades siguen los procedimientos preestablecidos. La evaluación del riesgo debe tener en cuenta tanto la probabilidad de que ocurra un evento, como las consecuencias si éste ocurre. En lo que respecta a las plantas modificadas genéticamente (OGM), deben tenerse en cuenta los efectos directos e inmediatos, así como también indirectos y retardados, razón por lo cual, es necesario monitorear cuidadosamente la variedad que ha sido aprobada.

En los inicios de la ingeniería genética, los datos y las metodologías carecían de una forma óptima de hacer una evaluación de riesgo para detectar la probabilidad de cambios inesperados en las propiedades de las plantas genéticamente modificadas. Esto afectó tanto a los legisladores como a la opinión pública. Hoy en día, millones de plantas transgénicas han sido desarrolladas y analizadas en los laboratorios de investigación de todo el mundo, tanto en las universidades como en las empresas e institutos. La experiencia global es, por lo tanto, muy grande. Se han desarrollado técnicas moleculares muy eficaces para detectar y medir cientos o miles de proteínas y otros componentes menores (por ejemplo, azúcares y aminoácidos), así como también los genes encontrados para esa especie en particular. Con la ayuda de estas técnicas modernas, la probabilidad de cambios inesperados se puede estimar con bastante fiabilidad.

En un gran número de estudios, las cantidades de ARNm (véase el Capítulo 3) de todos los genes se han comparado entre una planta genéticamente modificada y su equivalente original no modificado. Todas estas diferencias moleculares, en proteínas, ARNm y constituyentes menores, pueden ser comparadas entre dos variedades de la misma especie que hayan sido producidas por cruzamientos y selección en un programa de fitomejoramiento. Las diferencias entre la variedad genéticamente modificada y la variedad no modificada son significativamente menores que las diferencias entre dos variedades generadas con métodos “tradicionales”. Estos resultados hacen cuestionable la legitimidad de uno de los principales principios para la evaluación del riesgo. Las diferencias entre dos variedades “tradicionales” se consideran libres de riesgo y no se realiza ninguna evaluación del riesgo. Sin embargo, las “diferencias inesperadas” entre una variedad genéticamente modificada y su equivalente original no modificado son aún menores. Por lo tanto, la necesidad de una evaluación de riesgo de las plantas modificadas genéticamente no puede justificarse sobre la base de estas diferencias inesperadas. Este es un tema central para la gestión de plantas transgénicas. Una aplicación difícil de la legislación ha sido motivada por la existencia de incertidumbres en la tecnología –aunque la investigación en esta área demuestra lo contrario.

6.3. ¿Cuál es la referencia?

En el caso de la evaluación de riesgos de las plantas transgénicas, la referencia (o material comparativo) es la planta original que no está genéticamente modificada. Si la especie referencial es en sí misma perjudicial para los seres humanos o el medio ambiente, esto se supone irrelevante desde el punto de vista del sistema de evaluación vigente, lo que se considera es si existe algún riesgo adicional que surja de la modificación genética. Esto se puede comparar con la forma de evaluar el riesgo de un medicamento farmacéutico. Los fármacos se producen a menudo químicamente al combinar dos o más sustancias relacionadas entre sí. Lo determinante en su evaluación de riesgo es que el nuevo fármaco no sea peligroso, sin comparar cada uno de sus componentes. Otros productos tales como los químicos y los cosméticos también se evalúan de esta manera, lo que es radicalmente diferente de la evaluación de plantas transgénicas.

Este principio de referencia tiene consecuencias extrañas. En una evaluación de riesgo de una planta transgénica, que tiene por ejemplo un gen de resistencia a una determinada enfermedad fúngica, sólo se considera si el gen introducido puede representar un riesgo adicional. Si el efecto de la resistencia en el uso práctico es reducir el nivel de fungicidas y el nivel de micotoxinas dañinas (venenos fúngicos formados por muchos hongos nocivos) no se someten a evaluación. Ergot, o comenzuelo, causado por Claviceps purpurea, es un ejemplo de una infección fúngica que representa un gran peligro para la salud humana por la presencia de micotóxinas. Las plantas de maíz resistentes al patógeno también contienen menos cantidades de micotoxinas que otras, porque las plantas infectadas con el patógeno son más fácilmente afectadas por los hongos dañinos, por ejemplo, del género Fusarium. Por lo tanto, los beneficios para la salud humana no se incluyen en la evaluación. Muchos alimentos comunes, como las papas, no serían comercializados si sus riesgos potenciales para la salud se evaluasen con el mismo valor de referencia que los productos farmacéuticos o plantas transgénicas.

La falta de información relevante al discutir los riesgos de los cultivos transgénicos también se puede ver desde otra perspectiva. Se puede hacer un paralelo cuando se evalúan los riesgos con diferentes medios de transporte. Si se compara el riesgo en el transporte aéreo, ferroviario y automovilístico, y se calcula la probabilidad de un accidente, por ejemplo, trasladándose de Paris a Berlín con estos diferentes medios de transporte. A continuación, se utiliza uno de estos medios de transporte como referencia y se calcula cuánto aumenta o disminuye el riesgo si se utilizan los otros dos métodos. Por otro lado, no se compara el riesgo de daño si se aloja en Paris –estar allí no es una manera de transporte a Berlín. Al discutir los riesgos con los cultivos transgénicos, a menudo se compara cómo sería si no se siembra en absoluto. Una comparación relevante sería: aumentaría o disminuiría el riesgo para el medio ambiente o la salud humana al producirse una tonelada de trigo utilizando una variedad transgénica en comparación con la producción de la misma cantidad de trigo con la versión equivalente original.

Figura 6.1. *Ergot o cornezuelo, causado por* ***Claviceps purpurea****, es una de las enfermedades fungosas que afectan a los seres humanos y que mantienen en jaque la agricultura moderna. Fotografía: Patrimonio de Wikimedia.*

Una cuestión que confunde la discusión sobre las plantas modificadas genéticamente es su uso en la agricultura a gran escala versus en la agricultura a pequeña escala. A veces se sugiere que las plantas modificadas genéticamente son parte de la agricultura a gran escala, y que la agricultura a pequeña escala sería beneficiosa, por ejemplo, desde el punto de vista de la biodiversidad. El uso de la tierra en grandes partes del mundo por parte de la agricultura ha tenido ciertamente un impacto dramático en la vegetación y la vida silvestre del bosque, las especies y ecosistemas. La biodiversidad es, generalmente, más variable en un ambiente heterogéneo que en un paisaje homogéneo. Sin embargo, el impacto de la agricultura a gran escala en el paisaje es un aspecto no relacionado con la tecnología de las variedades transgénicas. Por lo tanto, es incorrecto afirmar que la agricultura a pequeña escala es mejor que la de gran escala en términos de biodiversidad, como un argumento para ir en contra de las plantas transgénicas.

6.4. Problemas de límites

Cuando los principios básicos de la legislación de la ingeniería genética en Europa se establecieron en el año 1990, se entendía claramente la diferencia entre lo que era una planta transgénica y la que no era, pero con el rápido desarrollo de la biología molecular la situación ha cambiado y en la actualidad está muy poco claro.

Las denominadas nuevas técnicas de fitomejoramiento (NBT, New Breeding Technologies), como el TALEN, el dedo de zinc y el CRISPR (ver Capítulo 3) generan mutaciones específicas. El resultado puede ser completamente idéntico a las mutaciones que pueden ocurrir espontáneamente en la naturaleza o a través de técnicas que no se consideran como transgénicas, como, por ejemplo, las mutaciones inducidas por los agentes químicos o por la radiación ionizante. En varios países, incluyendo EEUU, Guatemala, Honduras, Colombia, Brasil, Paraguay, Argentina, Chile, Nigeria, Israel, Australia y Japón, hay un precedente en que las mutaciones específicas no son consideradas modificaciones genéticas o transgénicas, pero en la Unión Europea la situación es distinta hasta ahora: si las plantas son generadas por nuevas tecnologías de ingeniería genética serán definidas como transgénicas. Por el contrario, si no se usan estas tecnologías, la legislación no las considerara transgénicas ni serán sujetas a regulación. La legislación requiere un método de detección que proporcione respuestas claras. Sin embargo, es imposible rastrear si una mutación ha ocurrido espontáneamente o por mutación aleatoria o por biotecnología. El cambio aleatorio no está regulado, mientras que los cambios que se derivan de una mutación dirigida también deberían ser considerados por las organizaciones que están en contra del uso de las plantas transgénica. Esta situación ilustra una difícil situación sobre los límites para realizar una discusión basada en evidencias científicas.

Otra cuestión discutible concierne a la cisgenia; por ejemplo: cuando un gen que podría ser transferido por el cruzamiento entre dos individuos de la misma especie o especies relacionadas se transfiere usando ingeniería genética (véase el capítulo 3). El resultado puede ser un genotipo o variedad bastante similar; por el contrario, en caso del mejoramiento convencional en que esto sucede de manera menos controlada y en donde muchos otros genes se transfieren por los cruzamientos tradicionales no se considera como genéticamente modificada pero la variedad tiene mayores diferencias con la original, al compararla con la obtenida por técnicas de ingeniería genética usando cisgenia. El Fitomejoramiento implica una combinación de diferentes genes y su posterior selección para obtener una variedad deseable a las necesidades de los agricultores. Si una planta transgénica se cruza con una variedad no transgénica, la legislación europea no considera la variación genética emergente del cruzamiento entre ambas plantas, y la nueva variedad no necesita ser evaluadas nuevamente. Sin embargo, si se cruzan dos variedades transgénicas, la nueva variedad generada debe ser reexaminada y evaluada para la obtención de la licencia. Si el mismo gen se introduce en dos variedades diferentes de la misma especie, por medio de la ingeniería genética cada una de ellas deberá pasar por una prueba separada. Por ejemplo, si un gen que proporciona resistencia al moho de la hoja se introdujera en dos variedades diferentes de papas, cada una debe ser evaluada. Esto es especialmente relevante para los cultivos en los que el cruzamiento sexual no ocurre, como en el caso de las variedades comerciales de plátanos, que no son fértiles y, por lo tanto, no pueden ser cruzadas.

6.5. ¿Hay algún riesgo con las plantas GM actuales?

Resistencia a herbicidas

Se ha realizado un gran número de estudios científicos para evaluar si una nueva característica puede representar un riesgo para el ser humano o el medio ambiente. La característica más comúnmente estudiada es la tolerancia a los herbicidas. El herbicida glifosato actúa bloqueando una enzima en la síntesis de aminoácidos aromáticos de la planta. Este es un proceso vital para la planta, que muere a partir del uso de glifosato. La tolerancia al glifosato se logra en las plantas genéticamente modificadas que tienen una variante diferente de esta enzima.

El eventual efecto negativo del glifosato no está específicamente relacionado con la modificación genética, ya que es un herbicida muy utilizado también en el cultivo de variedades resultantes del fitomejoramiento convencional. Por otro lado, los investigadores franceses postularon, en un informe presentado el año 2012, una relación directa entre el glifosato y una planta transgénica y un mayor riesgo al cáncer en ratas. Sus estudios fueron rechazados por los equipos de investigación a nivel mundial, autoridades reguladoras y asociaciones de expertos, porque claramente se interpretaron mal los resultados obtenidos y tuvieron ensayos de baja calidad y reproducibilidad científica. El consenso general apunta a que no hay efectos negativos (o son muy limitados).

Figura 6.2. *Un recipiente vacío que tenía glifosato (Herbolex) se ha dejado en un olivar en Corfú. Fotografía: Patrimonio de Wikimedia.*

Hay diversos estudios científicos acerca de los efectos sobre el medio ambiente por el uso de plantas transgénicas resistentes al glifosato, pero sus conclusiones varían. La cantidad total de herbicidas puede aumentar o disminuir cuando se cambia a cultivos resistentes a herbicidas o no resistentes. El uso elevado de un herbicida, como el glifosato, aumenta la velocidad de formación de la resistencia en las malezas, lo que a la larga reduce la utilidad del herbicida. Sin embargo, esto puede ocurrir con o sin el uso de plantas transgénicas. El desarrollo de la resistencia de las malezas es obviamente preocupante y se deben utilizar buenas prácticas agronómicas para evitarlo, sea en variedades OGM o convencionales.

Resistencia a insectos y hongos

De acuerdo a la información disponible, no se han observado efectos adversos en seres humanos o animales domésticos cuando se usan cultivos transgénicos con resistencia a los insectos, producto de la acción de las proteínas Bt/Cry (proteínas cristalinas). Por otra parte, al usar estos cultivos transgénicos, se ha reducido significativamente el uso de insecticidas. Esto ha traído, por ejemplo, grandes beneficios para la salud de los

Figura 6.3. *Número de suicidios entre los productores de algodón antes y después de la introducción del algodón Bt en la India. Fuente: Qaim, 2014.*

agricultores de algodón en la India. No hay evidencias científicas acerca de la tasa de suicidios en los agricultores de la India y el aumentado debido a la transición al algodón transgénico. El algodón transgénico resistente a los insectos ha aumentado las ganancias y la seguridad en obtener cosechas estables del cultivo para la gran mayoría de los productores de algodón de la India (Figura 6.3).

Un estudio de laboratorio indicó que la mariposa monarca (Figura 6.4) estadounidense podría ser amenazada con el cultivo de maíz Bt. Las investigaciones de campo realizadas demostraron que el efecto era lo contrario. La reducción de la pulverización con insecticidas de base amplia, producto de que los agricultores maíz Bt, benefició a varios insectos, incluyendo a la mariposa monarca. Se ha demostrado, además, que la disminución de la mariposa monarca comenzó mucho antes del cultivo del maíz Bt, y al parecer depende de otros factores.

Figura 6.4. *La mariposa monarca no se ve amenazada por el cultivo de maíz Bt. Fotografía: Patrimonio de Wikimedia.*

En algunos casos, el desarrollo de resistencia a las proteínas Cry ha sido demostrado entre las plagas de insectos. Los primeros informes ya se produjeron antes de que se descubrieran las plantas transgénicas con proteínas Cry y surgieron después del uso unilateral de preparaciones de Bt. La experiencia demuestra que las plagas tarde o temprano evolucionan para romper o evadir la resistencia de los diferentes cultivos, pero la esperanza es que la resistencia dure la mayor cantidad de tiempo posible. Sin embargo, las características de resistencia introducidas en los cultivos tradicionales de plantas o a través de la ingeniería genética funcionan de la misma manera.

Se ha argumentado que existe el riesgo de una mayor incidencia de insectos dañinos en cultivos resistentes a insectos. En China, por ejemplo, los problemas derivados del daño ocasionado por insectos en los campos cercanos a los cultivos de algodón han aumentado. Sin embargo, la explicación es que la aplicación de insecticidas disminuyó cuando se introdujo el algodón Bt. La disminución de las aplicaciones de insecticidas condujo a una disminución de la cantidad de insecticidas que llegaba a los campos circundantes, que previamente mantenían alejados el daño de los insectos en estos campos. A veces el efecto es lo contrario, el uso a gran escala del algodón Bt en la India ha reducido la población de insectos dañinos -y aumentado la población de sus enemigos competidores- de modo que incluso la aplicación de insecticidas en las variedades no resistentes se ha reducido. Este es un bioefecto secundario positivo de los cultivos Bt; a diferencia de la mayoría de los pesticidas químicos que se usan, el Bt es específico sólo para el insecto que se desea controlar. Esto significa que otros insectos –como son los polinizadores- no se ven afectados por un cultivo transgénico Bt.

Hay poca investigación sobre la resistencia a las enfermedades fungosas producidas por la modificación genética en cultivos comerciales de plantas transgénicas debido a que ninguna ha sido autorizada. Sin embargo, hay un trabajo de investigación muy sólido que demuestra que los ataques de diversas enfermedades fungosas en las plantas representan un peligro para la salud de los seres humanos y los animales por la presencia de las micotoxinas (venenos fúngicos) producidas por diversos hongos. La pregunta es cómo los fungicidas que en la actualidad se aplican, o la eliminación de variedades resistentes a estos patógenos, pudiera afectar a los seres humanos y el medio ambiente es una situación menos conocida en la actualidad. Una reducción general en el uso de pesticidas es deseable tanto por razones de salud, ambientales y económicas.

Otras características

Muchas variedades transgénicas con un valor nutricional mejorado están en desarrollo o en la etapa de planificación. Los efectos positivos son evidentes. Un aumento de la ingesta de β-caroteno tiene un efecto positivo para aquellos que sufren de deficiencia de vitamina A. Las personas que sufren de intolerancia al gluten se sentirán naturalmente mucho mejor cuando consumen un trigo que no presenta esa forma de gluten que les causa la intolerancia. La información que a veces se menciona sobre que las plantas transgénicas se convierten en venenosas o alergénicas es infundada. Generalmente se basa en estudios donde los genes que codifican sustancias tóxicas o alérgenos se incorporan intencionalmente en una planta, lo que naturalmente resulta en una planta que se ha vuelto tóxica o alergénica.

El flujo génico

Aunque los cultivos que usamos generalmente se siembran en el campo del agricultor, los genes de una planta cultivada pueden dispersarse fuera de la zona de cultivo a través de las semillas o el polen y pudiera fecundar otras plantas de la misma especie o de parientes silvestres estrechamente relacionadas del mismo grupo taxonómico. Este flujo de genes ocurre, sin embargo, en todos los sistemas de cultivo y los cultivos transgénicos no son una excepción. El flujo de genes que se produce en los cultivos transgénicos, ocurre en la misma medida en los cultivos convencionales.

El flujo genético de un cultivo transgénico es parte de la discusión. No se trata sólo del flujo de genes de una planta cultivada a sus parientes silvestres, sino que también entre diferentes variedades de la misma especie cultivada. En los casos en que los flujos génicos van de un cultivo transgénico a un cultivo convencional, la cosecha de este último podrá contener trazas de transgenes del anterior. Hoy en día, en Europa se considera una contaminación al igual que los residuos de plaguicidas, lo que hace que el cultivo se considere inadecuado de acuerdo con las normas utilizadas por ciertos sistemas de certificación. Sin embargo, la restricción no se justifica argumentando riesgos para los seres humanos, los animales o la naturaleza, ya que como se ha explicado en los capítulos anteriores, los cultivos transgénicos son seguros. Para evitar tales riesgos, en diversos países existe un marco regulatorio integral que incluye requisitos, con ciertas distancias mínimas entre los campos cultivados, cuando están presentes cultivos transgénicos y no transgénicos. La tolerancia cero para la ocurrencia no intencional de flujo génico, desde los cultivos transgénicos, no forma parte del marco regulador de la Unión Europea. Si las normas de producción ecológica de la Unión Europea se utilizan, la coexistencia con la “agricultura orgánica” no sería tan complicada como cuando se aplica la certificación donde, en principio, si germina un grano de polen de un cultivo transgénico este cultivo no cumple los requisitos de certificación.

Evaluación de riesgos ecológicos

La evaluación del riesgo ecológico que se hace sistemáticamente en cada solicitud para la evaluación de un cultivo transgénico comprende dos etapas. En primer lugar, se evalúa si el material genético puede propagarse a la naturaleza fuera de los agro-sistemas. Tal propagación pudiera ocurrir en parte por la dispersión de semillas en diferentes áreas del cultivo o porque el polen de la planta transgénica poliniza cualquier planta silvestre. En un segundo paso, se hace una evaluación de si la característica podría establecerse en el medio silvestre. A pesar de las extensas investigaciones y de un gran número de evaluaciones de riesgos sobre los cultivos transgénicos actuales, no se ha encontrado ningún ejemplo de que un cultivo transgénico con una característica indeseable haya logrado su establecimiento permanente en la naturaleza. Ya sea que se propague a través del polen o de las semillas, requiere que la nueva característica tenga una ventaja selectiva (es decir, un aumento de la aptitud en la terminología de la biológica evolutiva) para su portador, en comparación con los tipos (plantas) que carecen de la característica; sólo entonces puede establecerse en la población silvestre. La rama de la ciencia –Genética de Poblaciones– que estudia, entre otros aspectos, las probabilidades de que un gen se propague en una población, presentan una sólida base científica

que se remonta a la década de los años 30 y que puede explicar los escenarios de riesgo con respecto a los cultivos transgénicos.

Las características que son agronómicamente interesantes, por lo general, carecen de valor fuera de los sistemas de cultivo – no dan a los portadores de la característica ninguna ventaja. La tolerancia a un herbicida no es beneficiosa en un ambiente donde no se utiliza el herbicida. La situación es similar a los cultivos mejorados genéticamente por cruzamientos y selección, y no hay ningún problema en la conservación de la naturaleza porque estos cultivos no son competitivos en la naturaleza.

Sólo hay un caso del establecimiento en la naturaleza de una tolerancia. Es el estudio de Canadá que examinó cómo la resistencia al glifosato en la colza (*Brassica napus*) puede propagarse en una población silvestre de *Brassica rapa*, que es una maleza invasora originaria de Europa en América del Norte. También se investigó si la resistencia al glifosato se hereda de una generación a la siguiente. Las frecuencias de híbridos (*B. napus* x *B. rapa*) fueron inicialmente 35% (de 247 plantas examinadas) y 65% de los híbridos portaban el gen de tolerancia al herbicida. Tres años más tarde, la proporción de híbridos disminuyó a 3% y 2% que portaban el gen de tolerancia. Se había producido una propagación de la característica (resistencia al herbicida), pero disminuyó rápidamente su frecuencia. Obviamente, los híbridos mencionados tienen baja vitalidad o baja competitividad.

No hay evidencias de que los genes introducidos en una planta usando ingeniería genética se propaguen mayormente en comparación con los otros 20,000 a 50,000 genes encontrados en un cultivo tradicional. Un buen ejemplo, es la resistencia al tizón tardío encontrado en la variedad de papa Toluca, cuyo desarrollo tomó 45 años, después de la hibridación con una especie silvestre y a través de un proceso de retrocruzamientos. La misma resistencia se obtuvo en la variedad 'Fortuna' obtenida por ingeniería genética. Debido a que los parientes silvestres de la papa no se encuentran en Europa, y que especies como *Solanum nigrum* (tomatillo del diablo) y *S. dulcamara* (dulcamara) no pueden ser polinizados por plantas de papa, la probabilidad para que este gen de resistencia se disemine en la naturaleza es nula. Sin embargo, si hubiese existido la posibilidad de tener un receptor de polen en Europa, el riesgo de flujo genético hubiese sido el mismo entre Toluca y Fortuna, lo que no ocurrió. Sin embargo, en tales casos, la hibridación también puede ser vista como un valor evolutivo.

La col cultivada (*Brassica oleracea*) se originó a través de un proceso evolutivo sucesivo durante el período greco-romano en el Mediterráneo. La primera forma que se cultivó fue la col, que no difirió significativamente de los tipos silvestres. Sus hojas jóvenes y capullos de flores se utilizaron. A partir de estas simples formas foliares, se han desarrollado las grandes variedades que actualmente vemos de repollo (véase el capítulo 3). En Sicilia y Calabria, el sur de Italia, crecen viejas variedades de col en terrazas de pequeños productores, desde hace aproximadamente 2.000 años. El uso de la col es también el mismo que durante la época romana. En las rocas por encima de las terrazas crece una o más especies silvestres (principalmente *Brassica rupestris*) que tienen una cierta transversalidad con la col cultivada. Las semillas y el

Figura 6.5. *En el sur de Italia, viejas variedades de col crecen en terrazas de pequeños productores desde hace unos 2.000 años. En las rocas sobre las terrazas crecen especies silvestres de* ***Brassica****.*

polen se distribuyen entre las poblaciones cultivadas y silvestres y varios estudios han demostrado que hay un intercambio de genes de baja frecuencia en ambas direcciones. Esto ocurre continuamente y se puede considerar como una parte natural del desarrollo en formas silvestres y domesticadas.

La población europea de lechuga silvestre (*Lactuca serriola*) ha sido influenciada por el flujo genético de la lechuga cultivada (*L. sativa*), pero esto no ha causado ningún problema. Por lo tanto, los riesgos ecológicos de un pariente silvestre no serán diferentes si los genes pasan a través del fitomejoramiento tradicional o transferidos por la ingeniería genética.

¿Se puede concluir que no hay riesgos con las plantas GM?

Se ha debatido extensamente sobre si existen riesgos con plantas modificadas genéticamente (GM). La respuesta depende enteramente de cómo se formule la pregunta, y se hace de manera diferente dependiendo del lado del debate en el que se encuentre. Por ejemplo, para la pregunta ¿Podemos estar seguros de que no hay riesgos con las plantas transgénicas en general, o con una planta determinada en particular (como una soya tolerante a herbicidas)? Nadie puede responder que el riesgo es cero. Esto a veces se utiliza para requerir un alto grado de restricción. Sin embargo, el requisito previo para este razonamiento es que las plantas modificadas genéticamente se consideren aisladas, aparte del hecho de que otros métodos de fitomejoramiento también pueden presentar riesgos. Lo que la investigación ha demostrado inequívocamente es que, en general, no hay mayores riesgos con la tecnología transgénica comparada con los métodos tradicionales de fitomejoramiento que se utilizan para producir los cultivos que consumimos en la actualidad. Por lo tanto, se puede concluir que no hay razón para tener miedo o escepticismo con el uso de los cultivos transgénicos. En resumen, hay datos que demuestran que no hay un mayor riesgo para la salud humana o animal – en comparación con las plantas utilizadas en la agricultura de hoy– ya sea con plantas modificadas genéticamente, utilizadas hasta la fecha en la agricultura o desarrolladas, pero aún no cultivadas comercialmente. Es cierto que ha habido un problema con el desarrollo de la resistencia a herbicidas en malezas en algunas áreas donde se producen cultivos transgénicos resistentes, debido a la sobreexposición de herbicidas (comparar con el sobreuso de antibióticos que causan bacterias resistentes a las enfermedades). No se hubiese generado la misma polémica y atención con los cultivos tolerantes a herbicidas si se hubiesen generados por fitomejoramiento convencional de cruzamientos y posterior selección. Por lo tanto, no hay razón para que se argumente o se perciban riesgos específicos.

En cuanto a todos los demás OGM desarrollados hasta la fecha, los datos sugieren que los efectos de los cultivos transgénicos sobre la salud humana han sido neutros o positivos. Esto también se aplica a las modificaciones que aún no han sido autorizadas para su cultivo a una escala comercial. Desde un punto de vista científico, también se pudiera sugerir que se lleven a cabo evaluaciones de riesgo de todas las variedades producidas por diversas técnicas de fitomejoramiento, es decir, aquellos que actualmente no están bajo la legislación relacionada a los cultivos transgénicos. Sin embargo, tal sistema sería tan complicado y costoso como innecesario.

6.6. Etiquetado de productos GM

Un requisito frecuentemente recurrente es el “etiquetado de los OGM”. En la actualidad, los alimentos que contengan más de 0.9% de materias primas genéticamente modificadas deben estar etiquetados en la Unión Europea, por lo que, en la práctica, el debate –al menos en la Unión Europea– se refiere a los requisitos adicionales de etiquetado, como la carne de animales que se han alimentado con derivados de plantas transgénicas. En otros países existen otras leyes o regulaciones, por ejemplo, el etiquetado no es necesario en los Estados Unidos de Norteamérica. El etiquetado voluntario de productos derivados de GM parece estar aumentando. Sin embargo, la gran cantidad de aditivos alimentarios producidos por las bacterias genéticamente modificadas y las células de levadura no está incluida en los

requisitos de etiquetado, ya que tal monitoreo sería imposible de implementar. La industria no puede averiguar si una determinada sustancia, como la glucosa o el glutamato, fue originalmente producida a partir de un organismo genéticamente modificado o no. No se puede determinar, por ningún análisis del producto, pero el problema debe ser abordado bajo la premisa de que el flujo de todas las sustancias debe ser capaz de ser monitoreado a lo largo del proceso de fabricación, incluyendo su fuente, lo que se llama "trazabilidad". Lo mismo ocurre con los productos procesados a partir de plantas transgénicas. Por ejemplo, no es posible averiguar si un aceite es de una colza transgénica o una colza no transgénica, o si los proveedores tratan de vender el aceite de una planta transgénica como un producto libre de modificación genética, sin embargo, se exige la descripción de su trazabilidad como un requisito. Tampoco existe un etiquetado especial de todos los medicamentos producidos con microorganismos GM o de toda la ropa producida a partir de algodón transgénico (es decir, la mayoría). Los requisitos para el etiquetado son difíciles de manejar con respecto a los animales alimentados con materias primas GM. Dado que estos animales no difieren de ninguna manera de otros animales, un requisito no controlable fomentaría el engaño y la corrupción. El etiquetado puede ser importante si existe una motivación científica para hacerlo. Por ejemplo, si los productos son más o menos útiles o si pueden contener sustancias alergénicas. La cuestión del etiquetado de los productos GM no está motivada por una discusión de las características de calidad de los productos, sino por la resistencia a ciertas empresas asociadas con la tecnología. Sin embargo, si el consumidor desea manifestarse contra una empresa en particular, el etiquetado pertinente sería de la empresa que entregó la semilla – sea genéticamente modificada o no. La percepción es que una lucha por el etiquetado de organismos genéticamente modificados es lo mismo que una lucha contra ciertas empresas multinacionales, lo que es completamente irrealista.

6.7. ¿Por qué persiste tanto cuestionamiento sobre los riesgos asociados a las plantas GM?

Cuando la ingeniería genética se comenzó a utilizar en las bacterias en la década de los años 70, había preocupación por los riesgos que traía esta tecnología. Los investigadores acordaron una moratoria voluntaria a corto plazo hasta que se investigaran los riesgos. Cuando la ingeniería genética en las plantas se encontraba en sus inicios a principios de la década de los años 80, hubo una preocupación similar. Se estableció un marco regulador estricto y se dedicó mucha investigación al análisis de los posibles riesgos. La legislación estableció que cuando los resultados de la investigación mostraban que si los riesgos eran reales sería causal de no aprobación. Hoy en día, un gran número de diferentes plantas transgénicas se han desarrollado en laboratorios de investigación en todo el mundo y miles de investigadores con financiación público o en varias empresas privadas han estudiado las plantas genéticamente modificadas. Se han usado millones de dólares para evaluar los posibles riesgos de los transgénicos. Las plantas transgénicas se cultivan anualmente en una superficie significativa en el mundo, significando una disminución significativa del uso de pesticidas.

La conclusión de esta gran cantidad de datos de investigación y experiencia práctica es que no existe ninguno de los riesgos inicialmente planteados. Esto no ha afectado al acervo comunitario europeo, que en realidad se ha vuelto más estricto. Hoy en día es tan complicado (y en muchos países casi imposible) llevar a cabo un pequeño ensayo de campo con cultivos transgénicos como lo fue hace diez años. Las únicas plantas genéticamente modificadas aprobadas por la Unión Europea para su siembra comercial fueron las identificadas en los inicios de la ingeniería genética. Por otra parte, la oposición a los transgénicos entre los consumidores estadounidenses también ha aumentado.

7. EL CRECIMIENTO DE CULTIVOS TRANSGÉNICOS DESDE UNA PERSPECTIVA ECONÓMICA, SOCIAL Y POLÍTICA

Anteriormente hemos resumido la situación actual donde se relaciona la investigación con el fitomejoramiento, incluida la biotecnología, así como también los aspectos legales asociados. El tema de plantas modificadas genéticamente va más allá de lo anterior y tiene mucho que ver con la economía y la política. Como también, el papel de la sociedad en la investigación, el desarrollo y las fortalezas entre grandes y pequeñas empresas; entre las regiones ricas y pobres del mundo, entre instituciones sociales y grupos de interés. Además, el debate se sostiene muchas veces en cuestiones éticas y valóricas. Todo lo anterior, obviamente afecta a la opinión pública y las decisiones políticas legislativas a largo plazo.

7.1. ¿Cuál es el costo de no utilizar cultivos transgénicos?

Es posible analizar las consecuencias económicas de no usar los cultivos transgénicos disponibles dada la normativa vigente. Tal vez, aún más importante, son las consecuencias económicas producto de las limitaciones de la investigación y el desarrollo establecidas en el marco regulatorio por un largo período.

Un caso de estudio: Unión Europea

Hace unos años se intentó calcular el costo socioeconómico si Suecia se abstenía de cultivar la colza y la remolacha azucarera tolerantes a los herbicidas, o la papa con una composición de almidón modificada o resistente al tizón tardío. Desde el punto de vista económico, el uso de los cultivos tolerantes a los herbicidas, permite un control más eficaz de las malezas; al reducir el uso de la maquinaria agrícola y la utilización de la mano de obra en desmalezamiento, lo que se traduce en un mayor rendimiento o calidad de la cosecha. En el lado negativo, según su utilidad y aceptación en el mercado, podría haber un aumento en los costos por el uso de la semilla transgénica, así como en la cadena alimenticia desde el agricultor al sector minorista que surge como resultado de las reglas especiales y las prácticas de consumo que se aplican a los cultivos transgénicos. Por lo tanto, el análisis debe tener en cuenta la aceptación de la tecnología. Puesto que todos los consumidores no elegirían un cultivo GM, aunque fuera más barato, el modelo debe tener en cuenta el impacto de la aceptación en la demanda. En relación con lo anterior, también está el costo del etiquetado de cualquier producto que contiene materias primas de plantas transgénicas. Un producto que contenga por lo menos 1% de un cultivo transgénico debe ser etiquetado como organismo genéticamente modificado. Esto significa que a los costos de producción se suman otros dos adicionales: el coste del etiquetado y el costo para asegurar que el cultivo transgénico no se mezcle con un cultivo convencional.

La introducción de los tres cultivos GM podría proporcionar un beneficio neto para los consumidores de aproximadamente 275 millones de coronas suecas (aproximadamente US$ 27 millones a marzo 2020) anualmente en términos de menores costos para los cultivos considerados. Además, un beneficio para los productores por conservación de las tierras cultivables de aproximadamente 10,000 hectáreas, con un valor anual de aproximadamente 20 millones de coronas suecas (aproximadamente US$ 1.9 millones). Por lo tanto, la ganancia hipotética anual sería de aproximadamente 295 millones de coronas (US$ 28.5 millones). El beneficio anual ascendería a 14%, 11% y 5% del valor de la producción de remolacha azucarera, colza y papa, respectivamente.

Si estas cifras se traducen en toda la zona de la Unión Europea, con los rendimientos y las superficies actuales, la ganancia ascendería a 20,000 mil millones de coronas suecas (US$ 1.94 mil millones) por año y un ahorro de superficie agrícola de 645.000 hectáreas, lo que constituye ganancias ambientales importantes. Estas estimaciones requieren una aceptación total de los cultivos transgénicos, es decir, los compradores los perciben igual o

mejor que los cultivos convencionales. Además, se comparan dos posiciones de equilibrio, es decir, se confronta la situación después de pasar completamente a cultivos transgénicos con la situación antes de que se haya iniciado dicha transición. El resultado de este análisis estima el potencial de las ganancias socioeconómicas.

Las diferencias de costos tienen una influencia decisiva en las ganancias netas. Si en el caso del ejemplo de la remolacha azucarera se aproxima al 25% del costo original, cesa la rentabilidad socioeconómica. Además de la diferencia de costo, la aceptación de los cultivos transgénicos tiene un papel decisivo en el resultado socioeconómico. En el caso de la remolacha azucarera, el límite de rentabilidad socioeconómica es aproximadamente del 10% de aceptación, de lo contrario el costo diferencial supera a las ganancias de la productividad.

7.2. ¿Quién obtiene beneficios económicos de los cultivos transgénicos?

Hay una gran cantidad de resultados que abordan el impacto económico de la introducción de varios cultivos transgénicos con estimaciones para cada país o región. Las conclusiones son a veces diferentes. Los estudios financiados por la industria muestran sistemáticamente que la introducción de cultivos transgénicos conduce a grandes ganancias económicas; mientras que los estudios financiados por grupos que se oponen a esta tecnología muestran lo contrario. Los datos independientes son producidos por diversas instituciones académicas, agencias de la ONU e institutos de investigación dentro del sistema CGIAR. Respondemos esta pregunta, por lo tanto, con los datos de la investigación del profesor de economía paquistaní-alemán Matin Qaim (Figuras 7.1, 7.2 y 7.3). Otros investigadores han llegado a conclusiones similares.

La introducción del maíz Bt reduce el uso de insecticidas y aumenta el rendimiento de este cereal. Si se comparan los datos de los Estados Unidos de Norteamérica, España, Argentina, Sudáfrica y las Filipinas, se observa que existen diferencias significativas dependiendo de los sistemas productivos. Cuando los insecticidas se han utilizado previamente a gran escala (por ejemplo, España), el efecto más significativo es que la tecnología ha disminuido en el uso total de insecticidas, mientras que en los países donde el uso de insecticidas era bajo (por ejemplo, Filipinas) se observa principalmente un aumento en el rendimiento. La rentabilidad en el cultivo del maíz aumentó entre US$ 20 y US$ 126 por hectárea. En Sudáfrica, este estudio también mostró una distinción entre los pequeños agricultores y las más grandes: los pequeños agricultores fueron los que más ganaron con el cultivo del maíz transgénico (Figura 7.2).

Figura 7.1. *Cambios en el rendimiento, uso de insecticidas y ganancias del agricultor después de la introducción del maíz Bt en cinco países diferentes. Fuente: Qaim (2014).*

La introducción del algodón Bt en la India, China, Pakistán, Sudáfrica, Burkina Faso, México y los Estados Unidos de Norteamérica también ha reducido el uso de insecticidas y la diferencia es aún más drástica que con el cultivo del maíz Bt. En este caso, la rentabilidad ha aumentado entre 80 y 500 dólares por hectárea; nuevamente se muestran las mayores ganancias en los países más pobres, donde un menor número de agricultores ha podido combatir previamente insectos dañinos en sus cultivos (Tabla 7.1).

Tabla 7.1. *Cambio en el uso de insecticidas, rendimientos y ganancias de los productores después de la introducción del algodón Bt en siete países diferentes. Fuente: Kouser y Qaim (2013), Qaim (2014) y Vitale et al. (2014).*

	India	China	Pakistán	Sudáfrica	Burkinafaso	México	EE.UU.
Uso de insecticidas	-41%	-65%	-21%	-33%	-66%	-77%	-36%
Retorno de la inversión	+37%	+24%	+28%	+22%	+22%	+9%	+10%
Ganancias por hectárea (US$)	+$135	+$470	+$504	+$91	+$80	+$295	+$58

Otro aspecto interesante es analizar los beneficios que obtienen los actores que forman parte de la cadena. Por ejemplo, se han analizado los efectos económicos de la introducción de soya tolerante a herbicidas. Los sectores identificados son los agricultores, la cadena alimenticia hasta el consumidor y el proveedor de semillas (Monsanto). La ganancia anual global que el cultivo de soya transgénica, con tolerancia al herbicida glifosato, es de aproximadamente US$ 2.8 mil millones. De este beneficio, aproximadamente la mitad favorece a comercio, industria y consumidores, mientras que alrededor de un cuarto, a los agricultores y otro cuarto a Monsanto (Figura 7.3). Las diferencias entre Estados Unidos de Norteamérica y América del Sur, respectivamente, son significativas. En los Estados Unidos de Norteamérica, Monsanto gana la mayor parte (57%) por el cultivo de la soya transgénica con tolerancia al herbicida glifosato, mientras que en Sudamérica los agricultores son más beneficiados (86%). Esta diferencia se debe principalmente a la fortaleza de la ley de patentes en los Estados Unidos de Norteamérica. En promedio, los agricultores que utilizan la ingeniería genética han aumentado sus beneficios en un 69%.

Un grupo interesante representa la categoría “resto del mundo”, es decir, Europa y otras áreas donde la soya transgénica con resistencia al herbicida glifosato no se cultiva. Los costos de producir soya no transgénica aumentan un 34% debido a que el precio del mercado mundial cae a medida que la soya transgénica con resistencia al glifosato se hace más eficiente particularmente cuando se cultiva a gran escala como en los Estados Unidos de Norteamérica y Sudamérica. La cadena alimentaria y los consumidores son los grandes ganadores – U$435 millones del beneficio, mientras que los agricultores son los perdedores (34% de US$435 millones). Esto tiene grandes efectos en Europa. Más del 70% de la alimentación proteica del ganado de la Unión Europea es importada porque la producción no es rentable en este continente. Conseguimos carne y leche más baratas, en alguna medida porque la producción de soya en los países exportadores se ha vuelto más eficiente.

Tabla 7.2. *La distribución de los beneficios entre los diferentes actores en el cultivo de la soya transgénica con resistencia a glifosato (Modificado para el año 2010 de Qaim y Traxler, 2005).*

	Distribución comercial (%)			
	US$ (millones)	Agricultor	Comercio, industria y consumidor	Monsanto
Global	2.836	28	50	22
EE.UU. de América	838	21	22	57
Sudamérica	1.536	86	5	9
Resto	435	34	134	0

7.3. ¿Quién está liderando el desarrollo agrícola?

El debate sobre las plantas GM también refleja muchos otros aspectos del debate público-social. El motivo más fuerte para la resistencia a la tecnología de semillas transgénicas es el vínculo con el poder de las empresas multinacionales sobre la producción de alimentos y su influencia sobre la elección de la semilla por el agricultor. Sin embargo, la principal razón por la que un pequeño número de grandes empresas ha tenido una cuota de mercado significativa de las semillas transgénicas es la regulación sobredimensionada de la tecnología. El mejoramiento de las plantas financiado con fondos públicos y las pequeñas empresas que podrían lanzar variedades competitivas y romper el mono u oligopolio en que se encuentran a menudo, no lo pueden hacer porque los costos exceden los recursos financieros disponibles para estos actores. Hay una situación más complicada cuando la tecnología no es aceptada porque hay tan pocos actores, o porque los nuevos actores quebraron o cerraron debido a que la tecnología no tuvo aceptación.

El mejoramiento genético de plantas financiado con fondos estatales debe producir cultivos que beneficien al público. Esto se aplica, entre otras cosas, a los cultivos perennes que son un mal negocio para las empresas de semillas, en comparación a los cultivos anuales, ya que los agricultores que cultivan grandes áreas necesitan comprar semillas cada año (ver capítulo 5). Pero las perspectivas de comercialización de estas variedades -si se hacen con ingeniería genética- son tan malas que generan un desincentivo a intentarlo. La situación es una reminiscencia de la industria farmacéutica donde el costo de los ensayos clínicos es tan alto que sólo se justifican para los medicamentos con retorno alto, sea por precio y/o volumen de mercado. Por lo tanto, los medicamentos contra las enfermedades que afectan principalmente a los países pobres del mundo (como la malaria) o simplemente se necesitan tomar por un corto tiempo (como los antibióticos) son poco atractivos para su desarrollo por el sector privado. Para los medicamentos, esta es una cuestión difícil; ya que, pocos quieren la liberación de los fármacos en el mercado antes que las reacciones adversas se hayan evaluado completamente. Para las plantas transgénicas, la situación se invierte: no hay incertidumbre científica aquí. No son ni más ni menos riesgosas que las variedades desarrolladas por cruzamientos (o fitomejoramiento convencional), pero todavía se rigen por normas regulatorias muy estrictas.

La comunidad puede fijar objetivos para el desarrollo agrícola, como, por ejemplo, disminuir el uso de insecticidas a un cierto nivel, reduciendo las emisiones netas de dióxido de carbono o reduciendo la lixiviación a los lagos y los cursos de agua. La comunidad también puede proporcionar recursos para programas de fitomejoramiento que intenten alcanzar estos objetivos. Si las reglas de uso de la tecnología transgénica se hubieran diseñado sobre una base científica para que la aprobación del mercado pudiera seguir una evaluación de riesgo adecuada y con resultados positivos, los objetivos podrían ser mucho más fáciles de lograr.

La incertidumbre de la población sobre quién controla realmente el desarrollo y la liberación de los cultivos transgénicos ha conducido fácilmente a la sospecha. Por ejemplo, el lanzamiento de una "super-brócoli" con mejor calidad nutricional fue ampliamente discutido en el verano del año 2014. Los fitomejoradores acusaron que había una "brecha en la legislación de ingeniería genética" que consistía en el hecho de que la variedad no era una planta transgénica. El fondo del problema era que Monsanto poseía los derechos de esta variedad utilizando argumentos acerca de su utilidad, pero como esta compañía estaba asociada con plantas transgénicas, se argumentaba que podría haber una brecha en la ley. O sea, una "culpabilidad" por asociación, debido a que Monsanto, como una de las mayores compañías de semillas del mundo, era la dueña de una gran proporción de todos los cultivos transgénicos o de los ingredientes en los productos que se venden en los supermercados.

La oposición a los cultivos transgénicos es a menudo percibida como un "argumento de izquierda", porque se formula como una resistencia a las operaciones agrícolas a gran escala y a las grandes empresas transnacionales. Paradójicamente, el efecto de esta resistencia se ha convertido en todo lo contrario. La concentración de las empresas mundiales de semillas en las últimas décadas se ha visto acelerada por las ganancias que se han dado al monopolio u oligopolio de los enormes mercados de semillas de maíz, soya y algodón transgénicos en el mundo. Es así como las variedades transgénicas han sido capaces de ofrecer las características exigidas por los agricultores, como, por ejemplo, la resistencia a los insectos dañinos.

Figura 7.2. *"Super brócoli", una polémica Hortaliza. Fotografía: James Emmett / Daily Mail / REX.*

7.4. ¿Dónde deben tomarse las decisiones?

La cuestión de quién realmente debe tomar las decisiones sobre los cultivos GM es compleja. Por ejemplo, la autorización administrativa de los ensayos de campo para estos cultivos la realiza el Ministerio de Agricultura o el Ministerio del Medio Ambiente, mientras que a nivel de la Unión Europea es tratada por el Comisario de Sanidad y Protección del Consumidor. Todas las decisiones de su liberación al mercado se toman a nivel de la Unión Europea y deben tomarse por mayoría cualificada en un comité pertinente. Esto ha significado que una minoría de países miembros de la Unión Europea que, por razones políticas, se han opuesto al uso de plantas modificadas genéticamente durante la última década, han bloqueado su autorización. Puesto que los argumentos políticos y no científicos están detrás de estas decisiones, esto contradice los principios para la toma de decisiones establecidos por los países miembros, es decir, una evaluación de riesgos con base científica. Lo anteriormente expuesto, también conduce a un problema adicional: la ciencia pierde credibilidad y también pierde su rol en el debate social. Otro problema, en un mundo globalizado en que las decisiones en un país o región pueden tener un gran impacto en otros países o regiones; si la Unión Europea no autoriza la importación de una cierta variedad de soya GM de Argentina, el cultivo está bloqueado. Una "contaminación" de una variedad no autorizada destinada al mercado europeo puede significar que el lote se devuelva. Los riesgos económicos asociados han hecho que Argentina haya evitado cultivar variedades no aprobadas en la Unión Europea. Del mismo modo, los fitomejoradores públicos de la India evitan el uso de la tecnología transgénica para los cultivos exportados a la Unión Europea para evitar arriesgarse a un boicot, mientras que para todos los cultivos mejorados para uso doméstico se utilizan todas las tecnologías. En la mayoría de las regiones en África ven a Europa como un importante mercado de exportación. Cuando la Unión Europea señala que los cultivos transgénicos no pueden utilizarse, la consecuencia es evidente: se evitan los cultivos GM para no arriesgar sus exportaciones agrícolas. La pregunta es si una restricción de buscar el progreso agrícola de los países en desarrollo con sus propios medios no es otra cosa que proteccionismo; una opinión creciente en África cuestiona si la Unión Europea tiene el derecho moral de prevenir el desarrollo de esta manera. ¿Qué pasará con el fitomejoramiento de transgénicos en curso para la resistencia a organismos nocivos en cultivos tradicionales como la yuca, el plátano o los garbanzos que se realiza en los institutos de investigación públicos en África?

Figura 7.3. *Yuca, plátanos y garbanzos. ¿Se exportarán alguna vez a la Unión Europea las variedades transgénicas que los investigadores africanos financiados con fondos públicos africanos han mejorado genéticamente? Fotografía: Wikimedia Commons.*

Otro problema relacionado con la toma de decisiones apunta a la coexistencia de las variedades transgénica y no transgénicas. Los agricultores que cultivan maíz transgénico dentro de la Unión Europea deben mantener sus cultivos a una distancia suficientemente alejada de aquellos cultivos orgánicos para evitar la polinización con polen de maíz transgénico ya que la certificación de los cultivos orgánicos no permite contaminación con genes de plantas transgénicas. Asimismo, las distancias deben mantenerse con respecto a colmenas de abejas donde se produce miel orgánica, ya que éstas no pueden contener polen de maíz transgénico. Esta certificación europea también afecta los cultivos en otros países no europeos como, por ejemplo: la miel argentina que se exporta a la Unión Europea. Un representante argentino lo expresó de manera sorprendente: "No entiendo el razonamiento: si yo cultivo plantas transgénicas y su polen migra al campo del vecino, es culpa mía, pero si las abejas del vecino vuelan a mi campo para recoger polen, eso también es mi culpa". Por supuesto, la economía de los agricultores ecológicos no debe

verse afectada por sus vecinos, pero el dilema moral es si un sector de la agricultura –el ecológico– puede exigir que el resto de la agricultura asuma los costos de la coexistencia para cumplir con su propio concepto de mercado.

Se han aumentado los umbrales para asegurar que los cultivos transgénicos no se permitan a menos que se imponga una responsabilidad estricta. La responsabilidad es importante en todas las formas de negocio, pero luego debe aplicarse al cultivo de todas las plantas, independientemente de cómo hayan sido mejoradas genéticamente. ¿Quién es responsable de cultivar una variedad vegetal particular que podría crear problemas?, ¿El agricultor, la empresa que vendió la semilla o el obtentor/dueño de la variedad?, ¿Qué responsabilidad tienen las autoridades y agencias que revisaron y aprobaron su uso?

7.5. ¿Las plantas transgénicas merecen una pregunta ética?

Muchas de las preguntas anteriores están vinculadas a la moral y la ética; hay cuestiones relacionadas con las plantas transgénicas que son puramente éticas: ¿Los seres humanos tienen el derecho de continuar mejorando genéticamente sus cultivos (con o sin ingeniería genética) o es una forma de "jugar a ser Dios"?, ¿Tenemos derecho a influir en la capacidad de las personas de otros países para apoyar su agricultura?, ¿Deberían los fitomejoradores individuales, las pequeñas empresas de fitomejoramiento o los grandes grupos multinacionales tener derecho a una compensación por su trabajo para producir nuevas variedades mejoradas, ya sea a través de los derechos de obtentor o por medio de patentes?. De no ser así, ¿Cómo se asegurará la sociedad de que se continúe con el fitomejoramiento para que no se pare la lucha constante contra los organismos nocivos o que los cultivos sean adaptados al cambio climático? Puesto que todos los argumentos éticos que pueden ser esgrimidos en contra de las plantas transgénicas pueden también ser utilizados contra las variedades mejoradas genéticamente por cruzamientos en programas de fitomejoramiento convencional -y que no hay límites científicos justificados entre lo que es una planta transgénica y lo que no es- uno puede cuestionar si la diferencia entre la modificación a través de la ingeniería genética y las otras técnicas de fitomejoramiento es éticamente relevante.

Las posiciones éticas son importantes para formar actitudes, pero también otros factores que las afectan. El miedo es un factor que está fuertemente influenciado por la situación de la vida. Para los que compran sus alimentos, el miedo a "lo desconocido" puede afectar la actitud hacia la tecnología de ingeniería genética, pero para un agricultor pobre en Kenia, el miedo a los insectos que atacan su cultivo y reducen su rendimiento, así como el hambre resultante de una cosecha deficiente son probablemente más importantes.

¿Negro o blanco? ¿Cómo se percibe el debate sobre las plantas transgénicas?

En los inicios de la ingeniería genética en plantas, hubo muchos investigadores y empresas que prometieron más de lo que podían obtener. No sólo los que tenían intereses financieros en la industria, sino también los investigadores independientes subestimaron el tiempo que se necesitaría antes de producir y comercializar variedades que pudiesen mostrar el potencial de la tecnología. En la década de 1990, cuando se desarrolló la resistencia a la tecnología transgénica para el mejoramiento genético de los cultivos, el debate se polarizó entre la industria por un lado y el movimiento ambiental y los consumidores por otro. Los investigadores financiados con fondos públicos no pudieron intervenir en este debate. Se percibía que estaba demasiado polarizado y muchos sentían molestias al ser llamados mentirosos por la industria o por el movimiento ambientalista. Mientras tanto, la investigación siguió adelante en medio de esta "tormenta" ideologizada. La gran mayoría de los investigadores de plantas financiados con fondos públicos empezaron a usar plantas transgénicas en su investigación y sus posibles riesgos fueron evaluados a fondo; considerando una amplia gama para nuevas aplicaciones de esta tecnología. Muchos ensayos de campo se llevaron a cabo, aunque estos disminuyeron bruscamente en la UE después del cambio de siglo porque

muchos países dejaron de dar permisos o muchos de los ensayos de campo permitidos fueron vandalizados o destruidos; inclusive, científicos responsables fueron amenazados.

El problema para los investigadores y sus organizaciones es que son y deben ser independientes; además, mantenerse reacios a ser considerados como una de las partes en este conflicto. Las organizaciones de investigadores tampoco pueden actuar como grupos de presión para evitar perder su credibilidad. El debate ha quedado abierto a quienes tienen el poder y los recursos para llevar a cabo estas campañas, es decir, la industria por un lado y las organizaciones medioambientales, por el otro. Es fácil encontrar una situación mediática que establece preguntas a favor o en contra para enfrentar unos contra otros. El periodista trabaja no sólo como agencia de noticias, sino también como juez de un partido entre grupos de intereses opuestos; lo que ha puesto, el debate acerca del uso de la ingeniería genética en el mejoramiento de los cultivos en una posición desventajosa. Varios debates "a favor o en contra de GM" así como varias encuestas del público se han realizado en diversos países, especialmente entre los miembros de la OCDE. Es probable que esto contribuya a fortalecer la oposición a los cultivos transgénicos si el público percibe que la lucha es entre la industria y el movimiento ambientalista, porque muchos serán irreflexivos y automáticamente se alinearán con el movimiento ambientalista, particularmente en la Unión Europea.

En los últimos años, se ha producido un cambio parcial. La comunidad científica ha comenzado a mejorar su habilidad para compartir sus conocimientos y los avances de investigación relacionados con los pros y contras de las plantas modificadas genéticamente. De igual manera, y producto de algunas organizaciones ambientales, ha sido cuestionada por varios sectores del público esta tecnología. Aunque esto todavía no ha dado lugar a una reducción de la polarización, es necesario escuchar la voz de la ciencia, especialmente en un asunto que es técnicamente complejo y donde ya se tiene un alto conocimiento acumulado y que avanza muy rápidamente.

8. PERSPECTIVA INTERNACIONAL

8.1. Cultivos modificados genéticamente (GM) en todo el mundo

Desde que la siembra comercial de los primeros cultivos GM (tomate 'Flavr Savr' y el tabaco resistente al virus) comenzó a principios de la década de 1990, el porcentaje de cultivos genéticamente modificados (GM) usados en la agricultura mundial ha aumentado constantemente. En el año 2019, los cultivos GM se sembraron en 190,4 millones de hectáreas en todo el mundo (Figura 8.1), o sea, más del 10 por ciento de la superficie agrícola mundial. Desde sus inicios, hace 25 años, se han cultivado, a nivel mundial, una superficie total acumulada superior a 2.100 millones de hectáreas de cultivos GM, algunas veces también llamados cultivos biotecnológicos (Figura 8.1). En comparación, la superficie total de los campos cultivados en Reino Unido que es insignificante, con aproximadamente 3,4 millones de hectáreas, representa menos del 2 por ciento de la superficie mundial sembrada anualmente con cultivos GM.

Figura 8.1. *Hectáreas sembradas de cultivos GM desde el año 1996 a 2019 en países industrializados y en desarrollo. Fuente: ISAAA 2020.*

En el año 2018, los cultivos GM se sembraron en 28 países. Las áreas más grandes se encontraban en los Estados Unidos de Norteamérica, seguidas de Brasil, Argentina, Canadá, India, y en menor magnitud en Paraguay, Pakistán, China y Sudáfrica.

Figura 8.2. *Participación de variedades GM (porcentaje) sembradas en el año 2019 de los cuatro principales cultivos modificados: soya, algodón, maíz y colza (panel superior). Las principales características introducidas de los cultivos GM sembrados comercialmente siguen siendo la tolerancia a los herbicidas y la resistencia a los insectos (panel inferior). Eventos apilados corresponden a cultivos que poseen ambas características. Fuente: Adaptado de ISAAA (2020)*

Las características introducidas en la mayoría de los cultivos GM sembrados hasta la fecha han sido la tolerancia a los herbicidas (ht) y la resistencia a los insectos (Bt), es decir, la resistencia mediada por toxinas de *Bacillus thuringiensis* (véase el capítulo 2), ya sea por separado o en conjunto (Figura 8.2, panel inferior). Las especies más ampliamente cultivadas son la soya, el maíz, el algodón y la colza (Figura 8.2, panel superior). En el caso de la soya, se utilizó el 74 por ciento de la superficie mundial cultivada en el año 2019. Las proporciones correspondientes al algodón, el maíz y la colza fueron del 79, 31 y 27 por ciento, respectivamente.

Aunque los cultivos GM involucran a unas pocas especies con algunas características modificadas, el número de características modificadas en estas y otras especies está aumentando rápidamente. Ejemplos de especies modificadas genéticamente que se cultivaron comercialmente en el año 2018 incluyen a la calabaza, la papaya, la alfalfa, la remolacha azucarera, la berenjena, el álamo y la piña.

Actualmente, sólo está aprobada la siembra de un cultivo GM en la Unión Europea, una variedad de maíz designada MON810 que es resistente al gusano barrenador de maíz. En octubre del año 2019, había 140 variantes basadas en el MON810 en el catálogo común de plantas agrícolas de la Unión Europea. En el año 2018, de la superficie cultivada con maíz resistente a insectos (aproximadamente 121.000 hectáreas, 4% inferior con respecto al año anterior) el 95 por ciento estaba en España, y el otro 5 por ciento en Portugal. La República Checa y Eslovaquia han detenido la siembra de cultivos genéticamente modificados. La licencia de 'Amflora', la variedad de papa con almidón GM y producida por la empresa sueca Svalöf Weibull AB, ha caducado.

Así, todos los países de la Unión Europea, además de España y Portugal, han optado por abstenerse de participar en el desarrollo internacional de cultivos GM, que han tenido enormes impactos en otros lugares. Las situaciones en la Unión Europea y en el resto del mundo difieren drásticamente.

Actualmente los cultivos GM se siembran en una superficie ligeramente mayor en los países en desarrollo que en los países desarrollados. La principal expansión del cultivo GM se está produciendo también en estos países. En el año 2017 se plantaron cultivos transgénicos en ocho países asiáticos, en su mayoría para consumo interno. El algodón Bt resistente a los insectos se cultivaba en China, India y Pakistán (en más de un millón de hectáreas en cada caso) y Myanmar. Los agricultores de Bangladesh cultivaron berenjena Bt, mientras que el maíz Bt o ht se cultivaba tanto en Filipinas como en Vietnam. El algodón Bt

fue cultivado en más de 10 millones de hectáreas, por 7 millones de pequeños agricultores en la India (que representan el 93 por ciento de la producción total de algodón en India).

Los países africanos siembran en forma limitada los cultivos GM, y su posición entre los países en vía de desarrollo es similar los países desarrollados de la Unión Europea. De los 190 millones de hectáreas utilizadas para sembrar cultivos GM en el año 2017, sólo 2,9 millones de hectáreas (1,5 por ciento) estaban en África, y toda la zona cultivada estaba distribuida en dos países, Sudáfrica y Sudán. La producción de cultivos GM es mucho más extensa en Sudáfrica que en cualquier otro país africano, cultivando maíz transgénico, soya y algodón en aproximadamente 3 millones de hectáreas, mientras que Sudán cultiva algodón Bt en unas 200.000 hectáreas. Hoy en día, el 87 por ciento del maíz, el 92 por ciento de la soya y el 100 por ciento del algodón sembrado en Sudáfrica son variedades GM.

La organización colaborativa de las Academias de Ciencias Africanas, la Red de Academias de Ciencia Africanas (NASAC), ha expresado temores de que África quede atrapada por las mismas actitudes sombrías hacia los cultivos GM que agudizan su desarrollo en la Unión Europea. La NASAC teme que la participación de África en los avances mundiales en biotecnología se vea minimizada por la legislación restrictiva de la Unión Europea y la falta de coordinación en cuestiones de política: "Esta situación conduce a África a la periferia de las empresas mundiales de biotecnología debido a las políticas biotecnológicas incoherentes y a la regulación restrictiva de la bioseguridad" (NASAC, 2015).

La NASAC también señala que la tecnología tiene un gran potencial para la agricultura africana. Los cultivos ht son los más adecuados para el cultivo a gran escala. Por lo general, tienen poco atractivo para los pequeños agricultores en África, que a menudo eliminan las hierbas manualmente, a menos que haya escasez de mano de obra o las hierbas sean particularmente problemáticas. Sin embargo, los cultivos Bt son adecuados para cultivos a gran y pequeña escala. Además, la tecnología usada en los cultivos GM podría ayudar a los agricultores africanos a hacer frente a desafíos sustanciales, como la sequía, las enfermedades de las plantas, las plagas y la desnutrición; por tanto, África debe aceptarla. Si bien actualmente sólo se dispone de un número limitado de cultivos GM, su futuro en África es prometedor. La NASAC concluye que los beneficios se harán cada vez más evidentes a medida que más cultivos con más características modificadas estén disponibles, especialmente aquellas que satisfagan las necesidades específicas de los agricultores africanos.

Figura 8.3. *Las variedades mejoradas de yuca, frijol, maíz y batata o camote son ejemplos de cultivos enriquecidos nutricionalmente que la Academia Africana de Ciencias acoge con satisfacción. Estos cuatro cultivos están listos para su introducción en los mercados africanos. Fotografía: Wikimedia Commons.*

Varios de los principales actores de la investigación agrícola global están invirtiendo considerables recursos para ayudar al desarrollo que la NASAC está pidiendo. Varias organizaciones filantrópicas, como, por ejemplo, la Fundación Rockefeller y la Fundación Bill y Melinda Gates, invierten fuertemente en investigación en la agricultura africana, y para ella, así como en la organización internacional de investigación agrícola CGIAR.

8.2. Normas de la Unión Europea: cómo se aplican y su impacto

Las reglamentaciones legales relativas a los cultivos GM varían mucho en diferentes países. En los Estados Unidos de Norteamérica, por ejemplo, existen leyes que cubren claramente diferentes modificaciones y usos de los cultivos GM. Las regulaciones de la Unión Europea son estrictas y complicadas y están arraigadas en la Directiva 2001/18/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre la liberación deliberada de OGM, el Reglamento 1829/2003 sobre alimentos modificados genéticamente y el Reglamento sobre etiquetado y trazabilidad 1830/2003. En resumen, la autorización de un cultivo GM implica un proceso de tres pasos.

Figura 8.4. *El proceso de toma de decisiones prescrito en la Unión Europea para la aprobación de un cultivo GM.*

En el primer paso, cualquier persona que desee obtener la aprobación de un cultivo GM (el solicitante) debe evaluar los riesgos asociados de acuerdo con un procedimiento que cubra, entre otras cosas, la posibilidad de que los genes se propaguen desde un cultivo GM a especies silvestres (véase el capítulo 6). En una segunda etapa, esta evaluación del riesgo se presenta a un comité de expertos, designado por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) de la Unión Europea. Sobre la base de la evaluación del riesgo y sus propias consideraciones, la EFSA presenta una evaluación científica al Comité Permanente de Toma de Decisiones sobre Seguridad Alimentaria y Sanidad Animal.

De acuerdo con el reglamento, el Comité Permanente de Alimentación y Sanidad Animal debería aceptar las recomendaciones de la EFSA, y numerosos Comités Permanentes que manejan diversos tipos de solicitudes y preguntas en la Unión Europea casi siempre siguen las recomendaciones de los órganos de expertos correspondientes. Sin embargo, esto no se aplica a la aprobación de cultivos GM.

Figura 8.5. *La proporción de votos de los Estados miembros de la UE a favor, en contra y en abstención en la aprobación para su uso en el mercado de productos modificados genéticamente, siguiendo las recomendaciones de la EFSA. Después de EuropaBio, 2011. (Las cifras más recientes se pueden encontrar en el artículo de Mühlboch & Tosun, 2017, J. Comm. Market Stud. 56(2):385-402. Sin embargo, el panorama sigue siendo el mismo).*

Aunque el marco reglamentario establece que "... las normas de inocuidad de los alimentos deben basarse únicamente en datos científicos", algunos votan sistemáticamente en contra de las recomendaciones de la EFSA (Figura 8.5). Se requiere una mayoría cualificada (2/3 de los votos) para su aprobación, por lo

que todo el proceso de aprobación de cultivos GM para el cultivo en la Unión Europea se ha estancado. Los principios operativos de los Comités Permanentes deben aplicarse a todos ellos, y los demás siguen el principio prescrito de la toma de decisiones científicas, pero en este caso está sistemáticamente anulado por una postura prohibitiva.

El actual sistema de aprobación de la Unión Europea para los cultivos GM es costoso, requiere mucho tiempo y se centra en la tecnología usada y no en el producto obtenido. La falta de conexión entre las recomendaciones y decisiones científicas es insatisfactoria. Además de que las decisiones definitivas de aprobación, las decisiones son generalmente esencialmente políticas, ocho países miembros han invocado una cláusula de salvaguardia en la Directiva 2001/18/CE para prohibir los cultivos GM. Esto permite a los países miembros de la Unión Europea restringir o prohibir temporalmente el uso o la venta de una variedad genéticamente modificada aprobada para su comercialización, dentro de sus fronteras, si tienen razones fundadas para suponer que conlleva un riesgo para la salud humana o el medio ambiente. El Tribunal de Justicia de las Comunidad Europea ha confirmado que las prohibiciones nacionales impuestas son ilegales, pero a menudo se han confirmado con referencia al principio cautelar (véase el capítulo 9).

Es urgente invertir en investigación, desarrollo e innovación (I+D+I) para encontrar nuevas formas de aumentar la calidad y la productividad de los cultivos. Sin embargo, la voluntad de invertir en I+D+I en agricultura y promover una bio-economía basada en el conocimiento no encaja bien con la renuencia a explotar los resultados de la investigación para la innovación en la agricultura.

En resumen, las políticas agrícolas en la Unión Europea están sumergidas en muchas incoherencias. El objetivo es reducir el uso de pesticidas químicos, pero los métodos modernos para proteger los cultivos sin pesticidas están sobre regulados. Esto llevó a las empresas que produjeron papas resistentes al tizón tardío a anunciar en el año 2012 que pondrían fin a sus esfuerzos para liberar cultivos GM adaptados a las condiciones europeas.

Las consecuencias son las pérdidas económicas, la dependencia continua a los fungicidas y, a largo plazo, probablemente a una mayor invasión de papas importadas, ya que los requisitos para eliminar gradualmente el control químico de la plaga aumentan.

8.3. Propuestas de las academias de ciencias europeas

Muchos observadores y científicos afirman que la Unión Europea debe cambiar sus reglamentos sobre los cultivos genéticamente modificados. El Consejo Asesor Europeo de Academias de Ciencia (EASAC) ha propuesto una reforma integral de la legislación acerca de cultivos GM para hacerla compatible con otras reglamentaciones internacionales. Esto requiere un cambio de enfoque de la tecnología a los productos, y un análisis más completo de los beneficios y los riesgos, en lugar de enfocarse solamente en los riesgos y peligros. Esto es parte de un tema más general que EASAC ha desarrollado en un análisis más amplio de la innovación en diversos sectores. En el sector de la salud, por ejemplo, se estudian diferentes formas de evaluar los beneficios y los riesgos para tener en cuenta las prioridades de los usuarios. Análogamente, la regulación de las innovaciones agrícolas debe tener más en cuenta las prioridades sociales.

La opinión de EASAC es generalmente compartida por la comunidad de expertos en investigación financiada con fondos públicos. El análisis se publicó en el año 2013, pero los puntos principales de EASAC son tan válidos ahora como entonces:

- Las regulaciones actuales de la Unión Europea aumentan el tiempo y el costo del desarrollo de una nueva variedad genéticamente modificada en Europa: en promedio entre cuatro años y siete millones de euros en costos directos.
- En el año 2011 se realizó un menor número de ensayos de campo en la Unión Europea. El sistema de evaluación de ensayos de campo con cultivos GM es aleatorio, desproporcionado y excesivamente complicado, con un efecto fuertemente disuasorio para las inversiones.

- La vandalización de los ensayos de campo es un problema importante; la destrucción sistemática de los experimentos de las universidades, empresas e institutos de investigación gubernamentales aumenta aún más los costos de los ensayos de campo.
- Hay un importante retraso —a menudo muchos años— en el proceso de aprobación de los cultivos GM en la Unión Europea, incluso cuando se ha llevado a cabo una evaluación científica del riesgo y se ha informado de acuerdo con las normas.
- Sólo un cultivo GM, la variedad de maíz MON810, ha sido aprobado para su cultivo en los últimos 20 años, lo que ha dado lugar a grandes pérdidas de ingresos potenciales para los agricultores y las empresas de fitomejoramiento, así como para la productividad y sostenibilidad agrícola.
- Sólo las mayores empresas de fitomejoramiento tienen los recursos financieros para hacer frente a los largos y costosos procedimientos para solicitar la aprobación de un cultivo GM. Se desalientan las empresas más pequeñas, al igual que las empresas que brotan de la investigación agrícola financiada con fondos públicos.

Figura 8.6. *Vandalización de cultivos GM – aquí los activistas están destruyendo un cultivo experimental de maíz GM en el sur de Francia en el año 2014. Fotografía: Pascal Pavani /AFP/TT.*

Tras una reorientación política favorable, la EASAC predice que:

- la competitividad de la Unión Europea aumentaría,
- los riesgos de efectos negativos en otras regiones del mundo caerían,
- la producción de biomasa para fines distintos de los alimentos aumentaría, y
- el impacto ambiental mundial de la Unión Europea a través de la fuerte dependencia de la región de los productos agrícolas importados disminuiría.

8.4. Efectos sobre la competencia científica en Europa

Según la EASAC, las actitudes y el enfoque negativo (descrito anteriormente en este capítulo) están obstaculizando gravemente la investigación y el desarrollo agrícola en la Unión Europea. Se están perdiendo recursos para investigación del sector privado y la base científica del sector público está disminuyendo gradualmente. A pesar de la investigación académica y la biotecnología históricamente sólidas en Europa, se está debilitando la capacidad de la Unión Europea para abordar sus necesidades específicas y los desafíos mundiales en el ámbito agrícola. Los principales institutos de investigación agrícola se han cerrado y el sector se enfrenta a una fragmentación y reducción continua del financiamiento. Hay una falta de conocimiento para aplicar la bio-economía que la Comisión Europea quiere desarrollar en Europa. Las competencias científicas para llevar a la práctica un desarrollo agrícola sostenible se está erosionando por la pérdida permanente de investigadores en los países fuera de la Unión Europea y una disminución del empleo en la industria y la ciencia de base biológica.

Se están perdiendo personal competente en áreas clave de investigación por las dificultades a las que se enfrenta la biotecnología agrícola en la Unión Europea. Según la Royal Society en el Reino Unido, las competencias en botánica, fitomejoramiento, ciencias del suelo, patología vegetal, entomología, biología de malezas y microbiología ambiental

son particularmente pobres. Es evidente que es urgente que los responsables de los fondos de investigación a nivel de los países miembros de la Unión Europea aborden estas deficiencias.

También es esencial renovar los esfuerzos y apoyo del sector público al fitomejoramiento y reconstruir sus vínculos con la investigación académica. Otro problema es que otros países han recibido los beneficios de la tecnología desarrollada en Europa –por ejemplo, para generar plantas GM– debido a la pérdida de competencia europea para explotar los avances biológicos moleculares fundamentales en la práctica.

8.5. ¿Cómo podemos construir una bio-economía?

A pesar de los principales problemas y preocupaciones sobre la disminución de la competitividad y la erosión de la competencia científica en el sector agrícola, todavía se está llevando a cabo una ciencia de excelente nivel en la gran mayoría de países miembros de la Unión Europea. Por ejemplo, la importante I+D europea está proporcionando bases sólidas para la producción de bioenergía de última generación. Otras áreas importantes para una futura bio-economía incluyen los medicamentos a base de plantas. Los Estados Unidos de Norteamérica lidera en varias áreas relacionadas con la atención médica, como la producción de anticuerpos monoclonales y las proteínas herbarias para usar en la vacunación, ya sea en plantas enteras o células vegetales cultivadas. Los beneficios de las proteínas producidas por las plantas incluyen bajos costos de producción, libertad de material producido a partir de patógenos humanos y material para producir proteínas complejas, lo que no siempre es posible cuando se utilizan microorganismos.

Figura 8.7. *Los sustitutos de la sangre son ejemplos de proteínas farmacológicas que probablemente podremos producir en células de levadura, cultivos bacterianos o en plantas en un futuro próximo.*

Las posibilidades de explotación para la producción de nuevas moléculas orgánicas, proteínas o fármacos sólo se han investigado para una proporción muy pequeña de las innumerables mezclas de metabolitos vegetales conocidos. Sin embargo, la mayor disponibilidad de equipos para una rápida secuenciación e inversiones en biología sintética multidisciplinaria están aumentando enormemente el potencial de nuevos descubrimientos. Todo esto debe aplicarse enérgicamente para impulsar la bio-economía emergente, pero la normativa actual obstaculiza la innovación y el desarrollo, por lo que debe cambiarse para que la bio-economía florezca. Sorprendentemente, la política de investigación e innovación de la Unión Europea (UE Food 2030), formulada proyectivamente para hacer frente a los desafíos de la “seguridad alimentaria y nutricional”, casi ignora por completo el fitomejoramiento, aunque, presumiblemente, proporcionaría las bases esenciales para dicha seguridad alimentaria.

9. RECURSOS FITOGENÉTICOS, FITOMEJORAMIENTO E INGENIERÍA GENÉTICA PARA EL MEJORAMIENTO DE LOS CULTIVOS EN AMÉRICA DEL SUR

En América Latina y El Caribe existen al menos unos 15 millones de fundos o predios y más de 100.000 plantas de pequeño y mediano tamaño que procesan alimentos y productos agrícolas o producen insumos para la agricultura, y que, además, albergan algunos de los ecosistemas agrícolas (o agro-ecosistemas) con más complejidad en el mundo debido a su altitud, clima o topografía. América del Sur (o Sudamérica) incluye desde desiertos áridos y bosques tropicales húmedos hasta glaciares. El mayor bosque tropical del mundo es la Amazonía y allí se encuentra su río más largo: el Amazonas. Sudamérica es también uno de los más importantes centros de origen y diversidad de árboles y plantas comestibles, forrajeras, medicinales e industriales, particularmente en los Andes y la Amazonía.

En Sudamérica se originaron y diversificaron, entre otros, cultivos como: achiote (*Bixa orellana*), achira (*Canna indica*), ají amarillo (*Capsicum baccatum*) y panca (*Capsicum chinense*), ajipa o jicama (*Pachyrhizus ahipa*), algodón (*Gossypium* spp.), arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*), boniato o camote (*Ipomoea batatas*), cacahuate o maní (*Arachis hipogaea*), cacao (*Theobroma cacao*), cailhua (*Cyclanthera pedata*), cañihua (*Chenopodium pallidicaule*), caucho (*Hevea brasiliensis*), chirimoya (*Annona cherimola*), coca (*Erythroxylum coca*), fresa o frutilla (*Fragaria spp.)*, frijol o habichuela (*Phaseolus vulgaris*), guayaba (*Psidium guajava*), hierba mate (*Ilex paraguariensis*), kiwicha o amaranto (*Amaranthus caudatus*), locoto o rocoto (*Capsicum pubescens*), lúcuma (*Pouteria lucuma*), lulo o naranjilla (*Solanum quitoense*), lupino o tarwi (*Lupinus mutabilis*), maca (*Lepidium meyenii*), maracuyá (*Passiflora edulis*), mashua (*Tropaeolum tuberosum*), mauca (*Mirabilis expansa*), oca (*Oxalis tuberosa*), olluco (*Ullucus tuberosus*), pallar (*Phaseolus lunatus*), papa (*Solanum tuberosum*), papaya (*Carica papaya*), pepino dulce (*Solanum muricatum*), piña (*Ananas comosus*), quinina (*Cinchona officinalis*), quinua (*Chenopodium quinoa*), tabaco (*Nicotiana tabacum*), tomate (*Solanum lycopersicum*), tomate arbóreo o tamarillo (*Solanum betaceum*), uña de gato (*Uncaria tomentosa*), uvilla o capulí (*Physalis peruviana*), yacón (*Smallanthus sonchifolius*), yuca o mandioca (*Manihot esculenta*) y zapallo (*Cucurbita maxima*). Las dietas de las poblaciones indígenas contienen muchas de estas especies autóctonas.

Varios países de Sudamérica tienen reservas naturales delimitadas para la conservación in situ de los recursos fitogenéticos, pero ésta la realizan principalmente las comunidades locales que, aunque sin incentivos y apoyo gubernamental, contribuyen a la conservación de los parientes silvestres de las especies cultivadas, que son los antepasados o las especies de un taxón estrechamente relacionado. Sudamérica tiene que proteger en forma oficial sus agro-ecosistemas, particularmente aquellos sujetos a un alto grado de intervención antrópica, para de esta manera adoptar metodologías y programas de manejo sostenible que comprendan las especies autóctonas cultivadas por comunidades locales e indígenas, así como las especies exóticas naturalizadas.

9.1. El Estado de los recursos fitogenéticos para la agricultura y la alimentación en América del Sur

En la Argentina, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) apoya a una Red de Bancos de Germoplasma y colecciones de recursos fitogenéticos que conservan germoplasma, a corto y mediano plazo, y a un banco de germoplasma base que conserva duplicados de resguardo tanto de las colecciones de los bancos de germoplasma activos del INTA como de otras instituciones. Se conservan a corto, mediano y largo plazos 66.670 entradas, de las cuales el 62,5% tiene un duplicado en el banco de germoplasma base para su conservación a largo plazo. Los bancos de germoplasma del INTA tienen especies introducidas de interés económico y especies autóctonas de interés actual y potencial. También conservan germoplasma nacional y extranjero de

cultivos antiguos, líneas avanzadas de mejoramiento nacionales y extranjeras, poblaciones primitivas y especies emparentadas con los cultivos. Las especies incluyen avena (1287 entradas), boniato o camote (404), caña de azúcar (340), cebada cervecera (850), cebada forrajera (605), centeno (40), cítricos (952), duraznos y ciruelos (265), girasol y zanahoria silvestre (105), forestales nativas (258), forrajeras arbustivas patagónicas (156), forrajeras de clima templado (805), forrajeras de clima templado semiárido (949), forrajeras y ornamentales de la Patagonia Austral (877), frijol y quinua (618), manzana y pera (747), olivo (87), papa (1833), tabaco (180), té (189), yerba mate (773) y yuca (114). Los bancos de germoplasma en universidades, jardines botánicos y cooperativas de productores conservan especies forestales y silvestres, forrajeras, fresa, frijol, maíz, oca, olluco, papa, quinua y tomate.

El Sistema Nacional de Recursos Genéticos para la Agricultura y Alimentación (SINARGEAA) de Bolivia incluye a los bancos de germoplasma de raíces y tubérculos (achira, ahipa, arracacha, camote, mashua, oca, olluco, papa, yuca), cereales y leguminosas (arveja, frijol, haba, lupino, maíz, maní, trigo), granos alto andinos (cañihua, kiwicha, lupino, quinua) y frutales de valle (principalmente durazno y pera) que conservan 15.620 entradas (incluyendo ajíes, cucurbitáceas, maracuyá y uva). El Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF) tiene el manejo de los bancos de germoplasma que se encuentran custodiados por la Fundación PROINPA (raíces y tubérculos, granos alto andinos), Fundación Patiño (cereales y leguminosas) y Prefectura de Tarija (frutales de valle).

La Empresa Brasileña de Pesquisa Agropecuaria (Embrapa) estableció en 1974 el Centro Nacional de Recursos Genéticos (CENARGEN), cuya misión básica era coordinar los medios apropiados para la gestión de los recursos genéticos en Brasil. CENARGEN incorporó en 1984 investigaciones basadas en la biotecnología para la conservación y utilización de los recursos genéticos. Su nombre fue entonces modificado al Centro Nacional de Recursos Genéticos y Biotecnología, pero el acrónimo CENARGEN permaneció sin cambios. Más recientemente, se adoptó el nombre Embrapa Recursos Genéticos y Biotecnología que incluye al mayor banco de germoplasma del Brasil y uno de los más grandes del mundo, con más de 100.000 entradas de aproximadamente 600 especies de importancia socioeconómica que se conservan a –20°C. Embrapa Recursos Genéticos y Biotecnología también gestiona un sistema nacional de los recursos genéticos, que incluyen más de 243 bancos de germoplasma en varias regiones de Brasil, donde se conservan alrededor de 250.000 muestras de plantas, animales y microorganismos. Más de 170.000 entradas de plantas, incluyendo duplicados, hay en los bancos de germoplasma de Brasil; de los cuales unos 107.000 se almacenan en la colección base de CENARGEN y otros 63.000 en otras colecciones. Las colecciones más grandes son las de especies exóticas de interés social y económico primario porque los principales cultivos alimenticios que son importantes para Brasil dependen del germoplasma exótico.

En Chile, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA-Chile) es el curador nacional de los recursos fitogenéticos. INIA-Chile maneja una Red de Bancos fitogenéticos y microbianos. La Red de Bancos fitogenéticos consiste en un banco base para conservación a largo plazo y cinco bancos activos para conservación a mediano plazo. Estos bancos conservan 45.682 accesiones (32.766 accesiones sin duplicados). De la colección sin duplicados, aproximadamente un 92% de las accesiones corresponde a especies cultivadas (51% cereales, 28% leguminosas, 3% forrajeras, 2% hortalizas, 2% frutales, 2% papas y 4% a otras especies) y 8% a nativas silvestres. La colección de nativas silvestres es muy relevante ya que representa el 29% de la flora nativa chilena. Además de los bancos de INIA-Chile, existen otras iniciativas de conservación y jardines botánicos, los que se organizan en una Red de Bancos de Germoplasma coordinados por el Ministerio de Agricultura. Ejemplo de ello es la importante colección de papas de la Universidad Austral de Chile (2.338 entradas).

La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) conserva 17.138 entradas (12.000 de semillas ortodoxas a -20°C, 3.205 en campo en diversas localidades de Colombia y 1.387 duplicadas in vitro). También, 11 entidades

públicas (2.526) ó 7 privadas (8.244) manejan bancos de germoplasma. En total son 27.900 entradas (53,4% foráneo y 46,4% colectado: nativo, criollo y silvestre) de 350 especies que incluyen, inter alia, algodón, cacao, caña de azúcar, café, cítricos, guanábana, guayaba, lulo, maíz, mango, maracuyá, mora, palma de aceite, papa, piña, pitahaya, plátano, soya, tabaco, tomate, tomate arbóreo y uchuva. El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) del CGIAR conserva 31.718 entradas de frijol, 18.138 de forrajes y pastos y 5.728 de yuca.

El Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuaria (INIAP) y la Universidad Nacional de Loja (UNL) tienen los principales bancos de germoplasma del Ecuador. El banco de germoplasma del INIAP conserva 17.920 entradas (13.711 como semillas y 4.209 en campo o in vitro) de casi 300 cultivos y parientes silvestres provenientes de colectas, intercambio y custodia. La UNL tiene un banco de germoplasma con 5.754 entradas y el Centro de Investigación de Caña de Azúcar (CINCAE) incluye 443 entradas (en campo e *in vitro*).

Varias plantas cultivadas de importancia provienen del Paraguay (por ejemplo, camote, maní, piña, stevia, yerba mate y yuca), donde también se encuentran parientes silvestres. La conservación ex situ es de especies exóticas, criollas y nativas de uso tradicional se realiza principalmente en las Estaciones Experimentales del Ministerio de Agricultura y Ganadería (1972 entradas de 24 especies cultivadas –particularmente granos y oleaginosas– 78 forrajeras y 17 frutales nativos), en los campos experimentales, jardines y viveros de las Facultad de Ciencias Agrarias y la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Asunción (400 entradas, esencialmente frutales nativos, plantas medicinales y abonos verdes) y en los viveros de los municipios como el Jardín Botánico de la Ciudad de Asunción.

El Perú es reconocido como uno de los centros más importantes de biodiversidad y domesticación de especies en el mundo (182 especies de plantas nativas domésticas y centenares de variedades autóctonas), que está relacionada con sus recursos genéticos de diversos cultivos, larga historia agrícola y cultura asociada a su manejo y uso sostenible. Por ejemplo, existen 9 especies domésticas, 3.000 variedades autóctonas y 91 especies silvestres de papas, cuya diversidad se debe a agricultores que las cultivan en diferentes ambientes y altitudes. Los bancos de germoplasma de recursos fitogenéticos en el Perú incluyen 53.922 entradas de 255 especies de plantas alimenticias, frutales, medicinales, aromáticas, industriales, ornamentales, forrajeras y forestales. El banco de germoplasma de la Subdirección de Recursos Genéticos y Biotecnología del Instituto Nacional de Innovación Agraria conserva 17.147 accesiones de 201 especies alimenticias, medicinales, aromáticas e industriales. Hay 3.679 entradas en el banco de germoplasma del Programa Cooperativo de Investigaciones de Maíz de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y el Programa de Cereales de la UNAM conserva 2.942 entradas de quinua en su banco de germoplasma. El Centro Internacional de la Papa (CIP) del CGIAR conserva 16.958 entradas de papa, camote, y otras raíces y tuberosas andinas y mantiene in vitro 11.382 entradas de estos cultivos.

Los bancos de germoplasma del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) y la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República (UdelaR) conservan los recursos fitogenéticos más importantes del Uruguay. En el banco base de INIA Estanzuela se encuentran conservadas un total de 13.766 entradas de 322 especies: 10.188 de cultivos de secano (las más numerosas son de trigo, maíz y cebada), 1.983 de leguminosas forrajeras, 746 de arroz, 667 de gramíneas forrajeras, 135 hortícolas y 57 forestales. El INIA Las Brujas conserva 290 clones de papa (incluyendo 30 de *Solanum commersoni* con resistencia a marchitez bacteriana por *Ralstonia solanacearum*), 24 de camote (o boniato), 16 de arándano y una colección de clones indicadores de virus en fresa (o frutilla). En el banco de germoplasma de la UdelaR hay 3.304 entradas (35% poblaciones o variedades criollas de frijol, maíz, maní, tomate y zanahoria, 3.4% de *Hordeum* y 61.6% de especies silvestres).

Los bancos de germoplasma de Venezuela mantienen 16.827 entradas, siendo los principales el del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (10.698), el Centro Nacional de Conservación de Recursos Fitogenéticos (5.071 –principalmente silvestres, piña y cacao), la Unidad de Recursos Fitogenéticos

de la Fundación Desarrollos Agrícolas Naranjal Asociación Civil (3.083 de arroz, maíz, sorgo y soya) y el Centro de Investigaciones de Biotecnología Agrícola de la Universidad Central de Venezuela (2.614, particularmente camote, ocumo y yuca).

9.2. Fitomejoramiento en América Latina

La mayoría de los países de América Latina y El Caribe reconoció la necesidad de aumentar el número de fitomejoradores para fortalecer la capacidad nacional de utilizar los recursos fitogenéticos de acuerdo con los resultados de la evaluación nacional de fitomejoramiento y de la biotecnología asociada realizada en todo el mundo por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Los principales programas de mejoramiento genético en Argentina con financiamiento Estatal (E), Privado (P) por Convenios de Vinculación (CV) o Internacional (I) y utilizando germoplasma Nativo Silvestre (NS), Cultivos Locales (CL) naturalizado (N) o introducido cultivado (IC) y silvestre (IS) incluyen: ajo-cebolla (E – CV; CL, IC), algodón (E – CV; CL, IC), almendro (E; IC), arroz (E; IC), camote (E – I; CL – IC), caña de azúcar (E – P; IC), cereales menores (E – CV – P; CL – IC), cítricos (E; IC), cucurbitáceas (E; CL – N – IC), damasco (E; IC), durazno y nectarinas (E; IC), especies forrajeras (E – CV – P; NS – CL – N – IC – IS), forestales (E – CV – P; NS – IC – IS), frijol (E; CL – NS – N – IC), girasol (E – CV – P – I; CL – N – IC – IS), lino (E; IC), maíz (E – CV – P – I; CL – IC), maní (E; CL – IC), papa (E – I; CL – N – IC – IS), pimiento (E; CL – IC – IS), soya (E – CV – P – I; IC – IS), sorgo (E – P; IC), tomate (E – CV; CL – IC – IS), trigo (E – CV – P – I; CL – IC), vid (E; IC), y yerba mate (E – CV, NS – N). El Consejo Argentino para la Investigación y el Desarrollo de la Biotecnología publicó en el 2004, y en colaboración con el INTA en el 2010, “Biotecnología y Mejoramiento Vegetal” acerca de los métodos, objetivos y logros de la alteración de las plantas con fines prácticos con contribuciones de investigadores y especialistas en diferentes campos relacionados con el fitomejoramiento.

Se han establecido programas de mejoramiento genético de cereales (maíz y trigo), leguminosas (arveja, frijol, haba y maní), papa, especies horto-floro-frutícolas (ají, ciruela y durazno) y granos alto andinos (quinua) en Bolivia, donde se ha obtenido un mayor número de cultivos para cereales y leguminosas. Se han liberado también nuevos cultivos de papa provenientes de cruzamientos entre germoplasma nativo e introducido. La Fundación para la Promoción e Investigación de Productos Andinos (PROINPA) publicó “Estrategias y Perspectivas del Mejoramiento Genético de Papa (*Solanum tuberosum L.*) en Bolivia” en el 2010.

Brasil se ha convertido en un líder mundial en el mercado de productos agrícolas; el agro-negocio brasileño representó más del 20% de su producto bruto interno. El mercado brasileño de cultivos experimentó cambios significativos, lo que limitó la actividad comercial de comercialización de semillas a unas pocas empresas privadas que causó una alta concentración en el mercado; especialmente, para la soya, el maíz y el algodón. Embrapa ha participado en el mercado de genética vegetal desde 1975 e incorporando en éste cultivos desarrollados por los programas de mejoramiento de la corporación recursos genéticos de sus bancos de germoplasma. Embrapa tiene, por lo tanto, una contribución significativa en la industria de semillas en Brasil a la que suministra anualmente cultivos para todo tipo de mercados (competitivos, nichos y diversidad). Las especies vegetales con las que Embrapa participa en el mercado de semillas y plántulas son las siguientes: cereales (arroz, maíz, centeno, sorgo, trigo y triticale); cultivos forrajeros (*Brachiaria*, hierbas forrajeras del sur, maní forrajero, *Panicum*, pasto elefante, *Stylosanthes*); forestal y palmeras (açaí, araucaria, ecaulipto, palmera de durazno y pino); fruta (açaí, anacardo, bacuri/murici/camu-camu, banana, cítricos, coco, cupuaçu, fresa, manzana, nectarina/melocotón/ciruela, mango, maracuyá, papaya, pera, piña, uva y zarzamora); leguminosas, oleaginosas y fibras (algodón, caupí, frijol, girasol, ricino y soya); plantas medicinales, aromáticas y colorantes (pimienta larga); plantas para uso industrial (caucho, café caña de azúcar, guaraná, mate, palma africana y ricino); raíces y tubérculos (papa y yuca); verduras y especias (calabaza, cebolla, lechuga, melón, pimientos, pimienta negra, sandía, tomate y zanahoria). En el año 2011, Embrapa seleccionó para el cálculo de su “balance social” una muestra de 114 tecnologías y 163 cultivos,

que fueron desarrollados con múltiples socios y transferidos a la sociedad. Se estimó un beneficio de R$17.76 mil millones para el año 2011, lo que indica que por cada R$1 invertido en la corporación por el Gobierno Federal, ésta devolvió R$8.62 a la sociedad. A través de asociaciones público-privadas (APP) con la asociación de semilleros e industriales, Embrapa ha transferido material genético (líneas, híbridos, clones y poblaciones) más productivo al sector agrícola, con el objetivo de desarrollar la agroindustria brasileña. Las semillas y propágulos básicos son ofrecidos al sector productivo a través de convocatorias públicas. En el año 2011 Embrapa publicó el libro "Biotecnologia: estado da arte e aplicações na agropecuária" para dar una idea general de la biotecnología (incluyendo aspectos conceptuales) y su importancia histórica, actual y futura. Asimismo, el libro "Biotechnology and plant breeding – Applications and approaches for developing improved cultivars" editado por docentes de la Universidad Federal de Viscosa y de la Universidad de Sao Paulo se publicó el el año 2014 e incluye temas como la biometría aplicada al análisis molecular de la diversidad genética, los haploides dobles, las plantas genéticamente modificadas, los marcadores moleculares y la selección del genoma, entre otros.

INIA-Chile tiene importantes programas de fitomejoramiento en cultivos, frutales y forrajeras. En ellos se aborda también la agronomía de éstos para generar, adaptar y transferir conocimientos junto a tecnologías que mejoran la producción y calidad de los cultivos, frutales y forrajeras con un enfoque integral que considera la sustentabilidad ambiental, la rentabilidad de los sistemas productivos, los requerimientos de la industria procesadora y la alimentación saludable en Chile. Los principales cultivos mejorados son trigo panadero y candeal, triticale, avena, arroz, quinua, leguminosas de grano (frijol y lupino), papa, forrajeras, en tanto que los principales frutales son uva de mesa, cerezo y manzano. El INIA-Chile ha efectuado un aporte enorme al país liberando más de 260 variedades. También hay en Chile otros programas de mejoramiento genético públicos y unos pocos privados. Existen 896 variedades con registro de propiedad vigente (75% frutales, 16% agrícolas, 8% ornamentales y 1% forestales), de las cuales la mayoría son de origen extranjero, excepto en cultivos en un 35% son de origen nacional.

Los programas de fitomejoramiento del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), AGROSAVIA, los centros privados de investigación (Cenicafé, Cenicaña, Cenipalma y Cenibanano) y la Universidad Nacional de Colombia, han desarrollado cultivos con características deseables para Colombia; particularmente de arroz, caña de azúcar, café, hortalizas (cilantro, habichuela, pimentón, tomate y zapallo), maíz, palma y papa. La Universidad Nacional de Colombia publicó en el 2002 "Mejoramiento Genético de Plantas" que fue el resultado del programa de investigación en mejoramiento genético de hortalizas y de la enseñanza del fitomejoramiento. Este libro incluye los variados métodos de mejoramiento genético para autógamas y alógamas, resistencia genética a enfermedades y plagas, más el uso de la biotecnología en el mejoramiento genético.

El INIAP, CINCAE, el Centro de Investigaciones Biotecnológica del Ecuador y la Escuela Superior Politécnica del Ejército trabajan en el mejoramiento genético de amaranto, arroz, banano, cebada, frijol, lupino, maíz, maní, papa, quinua, soya, tomate y trigo. El INIAP tiene cultivos ligados a la seguridad alimentaria del sector pobre del Ecuador.

Los programas de mejoramiento genético del Paraguay son realizados por la Dirección de Investigación Agrícola del Ministerio de Agricultura y la Universidad Nacional de Asunción con el objetivo de incrementar el rendimiento, la calidad y resistencias a plagas y enfermedades para pequeños agricultores de subsistencia (algodón, camote, frijol, maíz, sésamo, yuca y zapallo) o para la agricultura empresarial y la exportación (girasol, maíz, soya y trigo). Se ha realizado también mejoramiento genético de fresa, melón, stevia y tomate.

El registro de cultivos comerciales de semillas del Perú incluye algodón, arroz, arveja, avena, caupí, cebada, frijol, haba, lenteja, maíz, pallar, papa y trigo. Los objetivos de su mejoramiento genético son recuperar la productividad (rendimiento y calidad) y sanidad, obtener líneas y cultivos con resistencia o tolerancia a plagas y enfermedades. El INIA, la UNALM, otras universidades de provincias y empresas privadas han liberado cultivos de ajonjolí, algodón, arroz, camote, cañihua, caupí, cebada, frijol, gandul,

garbanzo, kiwicha, lupino, maíz (amarillo duro y amiláceo), mashua, oca, olluco, pallar, papa, papayo, quinua, soya y trigo. Su impacto económico se puede medir a través de estudios económicos. Por ejemplo, el impacto del cambio de dos cultivos de camote susceptibles al complejo viral SPVD en Cañete, por dos cultivos resistentes fue de aproximadamente US$ 1.3 y 44% su tasa interna de retorno. A nivel nacional el rendimiento de camote aumentó de 9 t ha^{-1} a 14 t ha^{-1} en el período 1985–2003. Asimismo, se estimó que el cultivo de papa Canchán –generado por el CIP y liberado en 1990 por el INIA que estuvo entre los que más se cultivó en el país– genera un beneficio de US$ 284 ha^{-1} por el menor uso de fungicidas, mayor precio de mercado y mayor rendimiento de tubérculo. La productividad de papa en el Perú se duplicó de 6.4 t ha^{-1} en el año 1973 a 12.5 t ha^{-1} en el año 2009. El INIA en colaboración con el CIP y la Red LatinPapa imprimió el "Catálogo de Nuevas Variedades de Papas: Sabores y Colores para el Gusto Peruano" en el año el año 2012 en el que se incluyen los cultivos liberados en sus distintas estaciones experimentales con la participación activa y protagónica de los productores de papa. El Banco Agropecuario publicó en el año 2014 la segunda edición de "Mejoramiento genético y biotecnológico de plantas", escrito por docentes de la UNALM para entender el proceso del fitomejoramiento.

En Uruguay, el INIA realiza mejoramiento genético de arroz, cebada, cítricos, festuca y raigrás y trigo. El mejoramiento genético del trigo se enfoca en enfermedades, productividad y calidad. Se liberaron más de 10 cultivos de trigo en los últimos años que ocupan el 40% del área nacional. La estrategia del mejoramiento genético de la cebada se ha centrado en la calidad de la malta y la resistencia a las enfermedades. Dos cultivos de cebada de alto potencial de rendimiento ocuparon el 68% del área de siembra en el año el año 2011. El INIA ha desempeñado un papel clave en el mejoramiento genético del arroz: sus cultivos representan el 95% del área cultivada. Los cultivos forrajeros mejorados por el INIA y adaptados a distintos ambientes y sistemas de producción impactan decisivamente en la productividad y persistencia de cada componente de la cadena forrajera. El INIA abastece a las empresas con semilla básica de sus cultivos y de otros cultivos públicos forrajeros, hortícolas y frutícolas. El sector privado realiza el mejoramiento genético del maíz y la soya.

El INIA desarrolla la mejora genética de los principales cultivos de interés para la alimentación y la agricultura en Venezuela. Sus objetivos son desarrollar cultivos resistentes o tolerantes a plagas y enfermedades con adaptación a diferentes zonas agroecológicas y socioeconómicas del país y aumentar la competitividad de los sistemas productivos. La producción y distribución de semilla mejorada incluye a ajonjolí, algodón, arroz, frijol, maíz, papa, sorgo y soya.

9.3. Panorama general de la biotecnología en el contexto del mejoramiento genético vegetal en América Latina y el Caribe

Diez países de América Latina sembraron cultivos genéticamente modificados (GM) en el año 2019, incluidos Brasil (52,8 millones de hectáreas), Argentina (24 millones de hectáreas), Paraguay (4,1 millones de hectáreas), Bolivia (1,4 millones de hectáreas), Uruguay (1,2 millones de hectáreas), México (223.000 hectáreas), Colombia (101.188 hectáreas), Honduras (37.386), Chile (14.336 hectáreas), y Costa Rica (297 hectáreas) para un total de 83,87 millones de hectáreas, que representan el 44% de las 190,4 millones de hectáreas de cultivos GM a nivel global. Los marcos regulatorios favorables, la alta demanda en los mercados, y la alta rentabilidad han incentivado a que los agricultores de la región crezcan cultivos GM.

A su vez, países como Brasil y Argentina tienen la capacidad de desarrollar sus propios cultivos transgénicos. Por ejemplo, Embrapa utilizó ARN de interferencia (RNAi en inglés) para silenciar el gen viral rep (AC1) y generar una línea transgénica de frijol inmune al virus del mosaico dorado del frijol (BGMV), que es uno de los mayores obstáculos para la producción de esta especie en América Latina. Asimismo, Argentina aprobó una soya tolerante a la sequía basada en investigación pública en la Universidad Nacional del Litoral, la que es comercializada por una empresa nacional. De la misma manera, a través de la empresa argentina Bioceres junto con la multinacional francesa Florimond Desprez, se ha desarrollado una variedad de trigo GM

tolerante a la sequía, el cual aún no es comercializado, pero ya hay más de 50.000 hectáreas sembradas en Argentina con este trigo aprobado en el año 2020 por el Gobierno de ese país.

Chile, Colombia, Costa Rica, Perú y Uruguay tienen la capacidad de utilizar técnicas de fitomejoramiento convencionales y modernas. Sin embargo, los países restantes de Centroamérica, así como Bolivia, República Dominicana y Paraguay tienen una capacidad muy limitada para usar las técnicas de fitomejoramiento convencional y para realizar aplicaciones modernas de agrobiotecnología. El nivel de recursos humanos y de financiamiento de la agrobiotecnología por cada país puede explicar tal heterogeneidad, así como explicar una notable dilución de la capacidad de innovación de la agrobiotecnología en muchos países de la Región. Muchos equipos de investigación universitarios o nacionales están mal conectados o integrados, tienen una alta dispersión de instalaciones y carencia de mano de obra calificada. La agrobiotecnología en América Latina y el Caribe sigue un modelo académico cuyos objetivos a veces no responden a las necesidades de producción sostenible de cultivos y seguridad alimentaria de esta Región.

La participación del sector privado en la investigación agrícola en la Región es superior a África y Oriente Medio, pero inferior a la de algunos países de la región de Asia y el Pacífico. Los productores multinacionales de semillas y agroquímicos –como Badische Anilin- und Soda-Fabrik (BASF), Corteva, Bayer CropScience, y Syngenta/Chem China– realizan activamente la investigación y el desarrollo agrícola en la Región, al igual que los productores multinacionales de frutas como Chiquita, Del Monte y Dole. En el año 2002 había más de 400 empresas privadas de biotecnología en Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, Guatemala, México, Perú, Paraguay y Uruguay en diversos sectores: agricultura, alimentación, salud humana y animal, medio ambiente e industria. Los productos agro-biotecnológicos más importantes de América Latina y el Caribe son plántulas probadas por patógenos provenientes de micro-propagación (o cultivo de tejidos), marcadores de ADN para caracterizar el germoplasma y el diagnóstico, cultivos transgénicos y, en menor medida, fitomejoramiento facilitado por el uso de marcadores moleculares.

9.4. La ingeniería genética en el fitomejoramiento (con énfasis en el Cono Sur)

Si bien Chile fue el primer país de Sudamérica en iniciar el diseño y producción de organismos transgénicos en el año 1987, no fue el primero en incorporarlos dentro de sus cultivos agrícolas para su venta interna. En el año 1993 el Servicio Agrícola y Ganadero, dependiente del Ministerio de Agricultura, promulgó el primer reglamento específico relacionado con los cultivos transgénicos en Chile, regulando la importación y liberación ambiental de semillas transgénicas sólo para multiplicación con fines de exportación de semilla y para pruebas de campo, pero no para uso nacional. Debido a sus condiciones ideales de cultivo, Chile se ha convertido en un país clave a nivel global para abastecer los mercados de contra estación con semillas de tres de los cuatro principales cultivos GM (maíz, soya y colza).

Cuatro años más tarde que Chile comenzara, en el año 1991, la biotecnología agrícola tuvo su inicio en Argentina con la creación de la Comisión Nacional de Asesoramiento sobre Biotecnología Agrícola; año en que el marco regulatorio argentino autorizó más de 2000 pruebas de campo, con diferentes combinaciones de características y cultivos; inclusive, cabe destacar que este país fue el primero de Sudamérica en incorporar cultivos de organismos genéticamente modificados o transgénicos, con la introducción de una variedad de soya resistente a glifosato el año 1996. Brasil fue el segundo país de Sudamérica en incorporar cultivos transgénicos; en este país, desde el año 1995 la ingeniería genética comenzó su actividad en el ámbito de la investigación de laboratorio y pruebas de campo, así como en el desarrollo y uso de productos, todo lo anteriormente expuesto, al alero del marco regulatorio de la resolución N° 8974 promulgado el 5 de enero del mismo año. Esta normativa estableció un mecanismo de control de las actividades que usarían la ingeniería genética y un sistema de evaluación de bioseguridad de los productos derivados del área; es decir, de los transgénicos.

El área cultivada con cultivos transgénicos aumentó rápidamente en América Latina y el Caribe, superando los 83 millones de

hectáreas en el año 2019. Los principales cultivos utilizados han sido soya, maíz, algodón, alfalfa y caña de azúcar con tolerancia a herbicidas y resistencia a insectos o combinaciones de ambos. No obstante, los investigadores nacionales están produciendo algunos cultivos transgénicos (por ejemplo, frijol, maíz o soya), que ahora están a la espera de su aprobación para su futura comercialización. Asimismo, la alianza pública privada (APP) permite la colaboración entre los sectores en la que cada uno contribuye a la planificación, los recursos y las actividades necesarias para lograr un objetivo mutuo. Por ejemplo, Embrapa y BASF establecieron una APP para el desarrollo de cultivos de soya tolerantes a herbicidas adaptados localmente. En el año 2009, fue aprobado para su comercialización Cultivance™, desarrollado a través de esta APP, que le permite a Brasil desarrollar su propia agro-biotecnología, así como tener acceso restringido a biotecnología con derechos de propiedad intelectual.

En América del Sur se demostró que la adopción de los cultivos GM en un país dio lugar a la difusión de esta biotecnología; inicialmente ilegal, a través de las fronteras, en países que en un principio se mostraron reacios a legalizar su uso. Por ejemplo, la soya resistente al glifosato fue cultivada ilegalmente en los estados más meridionales de Brasil en el año 1997, un año después de la adopción legal en Argentina. No fue hasta el año 2003 que el Gobierno de Brasil legalizó el cultivo comercial de esta soya transgénica cuando más del 10% de la soya del país había estado utilizando la tecnología ilegalmente. Desde entonces, el uso de esta biotecnología se ha extendido al cultivo del algodón en el año 2006 y al cultivo del maíz en el año 2008. Un proceso similar de adopción ilegal generalizada de soya resistente al glifosato ocurrió en Paraguay y Bolivia antes de que los respectivos gobiernos autorizaran su siembra.

En el Tabla 9.1 se resume los impactos de los ingresos agrícolas en los países sudamericanos que adoptaron cultivos transgénicos resistente al glifosato (RR) o a insectos (Bt). Estos datos ponen de manifiesto el importante beneficio en el ingreso agrícola derivado de la soya RR en Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay.

Tabla 9.1. *Beneficios (US$ millón) por ingresos derivados de cultivos transgénicos en América del Sur (1996–2014).*

País	Soya RR	Maíz RR	Algodón RR	Maíza *Bt*	Algodón *Bt*	Soya RR + *Bt*
Argentina	16.436	1.243	145	678	803	34
Bolivia	636	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
Brasil	6.317	1.368	133	4.787	72	1.100
Colombia	s.d.	4	23	82	19	s.d.
Paraguay	1.029	1	s.d.	13	s.d.	26
Uruguay	143	1	s.d.	25	s.d.	14

Fuente: Brookes y Barfoot (2016). (s.d.= sin datos)

9.5. Cultivos transgénicos en Argentina

Argentina es el tercer mayor productor mundial de cultivos GM –con 24 millones de hectáreas en el año 2019 y ocupando casi el 13% de la superficie global– particularmente de algodón, maíz y soya, con distintas combinaciones de tolerancia a herbicidas y resistencia a insectos. La evolución de la superficie cultivada con transgénicos en este país muestra una tendencia al crecimiento. Durante la temporada de cultivo del año 2015/2016, casi el 100% de la superficie de soya y algodón y el 96% de la superficie del maíz estaba sembrada con cultivos GM.

Figura. 9.1. *Evolución de la superficie de transgénicos en Argentina. Fuente: ArgenBio (2016).*

El proceso de adopción de las tecnologías OGM comenzó en el año 1996 con la introducción de la soya tolerante a los herbicidas con glifosato y ha continuado ininterrumpidamente con una tasa de adopción dinámica casi sin precedentes a escala mundial que abarca la casi totalidad del área cultivada de algodón, maíz y

soya. Los beneficios brutos acumulados se estiman en casi US$ 127 mil millones (93,3% soya, 4,3% maíz y 2,4% algodón). Luego de la aprobación de la soya tolerante al glifosato en el año 1996, el área sembrada con soya GM pasó de representar de un 5% a más del 80%. Esto ha posicionado a la Argentina entre los principales productores de cultivos GM a nivel mundial.

La mayor parte de los beneficios de la soya, que se generaron a partir de la expansión del área cultivada y una reducción de costos, fueron a favor de los agricultores (65,9%), el Gobierno Nacional argentino (27,4%) a través de las retenciones a la exportación y los proveedores de insumos (6,7%) tales como semillas y herbicidas. El impacto global en la disminución del gasto de los consumidores asociado a la adopción de soya transgénica en Argentina se estimó en casi US$ 153 mil millones, lo que sumado a los beneficios estimados para la economía argentina (US$ 118 mil millones) da un total acumulado de US$ 271 mil millones. Los precios de la soya hubiesen sido 14% más elevados de no haber sido por esta tecnología de semilla OGM.

En el maíz, 45,2% de los beneficios fueron para los agricultores, 17,7% para el Gobierno Nacional y 37,1% para los proveedores de tecnología (31,4% para semillas), mientras que 95% de los beneficios del algodón fueron para los agricultores y el 5% restante para los proveedores de semillas (3%) y uso de herbicidas (cerca del 2%).

Además de los beneficios antes mencionados, también se ha estimado el impacto que las tecnologías OGM han tenido en términos de creación de empleo, entre el momento de su introducción y la última campaña agrícola (2015/2016). De acuerdo con las estimaciones hechas dentro del período de 20 años después de su adopción, el total de puestos de trabajo creados por la economía argentina, que podrían atribuirse a tales tecnologías, sería de más de 2 millones. Varios factores contribuyeron a esta "revolución", pero probablemente uno de los más importantes fue la introducción de las nuevas tecnologías de modificación genética. Este alto nivel de adopción de esta nueva tecnología agrícola también fue el resultado del apoyo político, la capacidad de resolver las necesidades de los agricultores prevalentes, los factores económicos y los ambientales, así como también la implementación temprana de las regulaciones efectivas. La voluntad política de estudiar esta nueva tecnología y los cultivos también tuvo un rol importante, así como el reclutamiento de profesionales y científicos que desarrollaron el marco regulatorio necesario para trabajar con estos nuevos cultivos.

Los agricultores jugaron un papel decisivo; ya que, la adopción de esta nueva tecnología que resolvió algunos de sus problemas agronómicos, los ayudó a realizar prácticas agronómicas más sostenibles y proporcionó beneficios económicos. Sin embargo, todos estos adelantos no hubieran sido posibles sin un marco normativo adecuado, basado en la ciencia y lo suficientemente flexible para que garantice que los cultivos transgénicos sean seguros en la alimentación y el procesamiento. El grado de satisfacción de los agricultores argentinos con respecto a los beneficios que les proporcionan los transgénicos, queda en evidencia con las altas tasas de adopción de estos cultivos en el sector agropecuario, las que corresponden a una de las más altas en comparación a otras tecnologías, superando incluso a las tasas observadas con la incorporación de los cultivos de maíz híbrido. Esto debido a que los transgénicos ofrecen potenciar una mejor calidad de la producción, una disminución de los costos, una reducción del uso de insecticidas, una mayor flexibilidad en el manejo de los cultivos y un aumento del rendimiento.

Figura 9.2. *Evolución de los cultivos genéticamente modificados en Argentina (como % del total década cultivo). Fuente: ArgenBio (2016).*

En el año 1991, se registraron en Argentina las primeras autorizaciones de cultivos transgénicos para ensayos de campo; los cuales fueron, soya con tolerancia a glifosato y algodón y maíz con resistencia a insectos. Así, las autorizaciones comerciales se registraron desde el año 1996 cuando se libera el cultivo de soya tolerante al glifosato. Desde sus inicios, hasta la actualidad, se han aprobado 36 eventos para el cultivo comercial de maíz, soya y algodón; incluyendo características de tolerancia a herbicidas y resistencia a insectos o combinados. Además, se han aprobado una papa resistente a virus, soyas con ácido oleico alto, con tolerancia a los herbicidas y a la sequía, cártamo con expresión de pro-quimosina bovina en la semilla, alfalfa con tolerancia a glifosato y disminución en el contenido de lignina, y una variedad de trigo con tolerancia a sequía y a glufosinato de amonio.

La normativa argentina regula todos los aspectos relevantes en torno a la experimentación y liberación de transgénicos. Desde los inicios de estas actividades en el país en el año 1991 hasta la actualidad. El organismo responsable de llevar a cabo esta tarea es la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación (SAGPyA), dependiente del Ministerio de Economía y Producción, y cumple la función de asesorar a la SAGPyA sobre los requisitos técnicos y de bioseguridad que deben reunir los materiales genéticamente modificados previamente a su liberación. Además, en el año 1991 se creó, por Resolución N° 124, la Comisión Nacional Asesora de Biotecnología Agropecuaria (CONABIA). En Argentina existe una regulación estricta respecto a esta materia, por lo que para que un organismo genéticamente modificado pueda llegar al mercado debe pasar por tres áreas de evaluación: (a) de efectos en el agro-ecosistema a cargo de la CONABIA, (b) de aptitud alimentaria a cargo del Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agropecuaria (SENASA) y (c) acerca de la conveniencia de su comercialización, a cargo de la Dirección Nacional de Mercados Agroalimentarios. Al respecto, las condiciones que debe cumplir el material genéticamente modificado para que se autorice su liberación al medio ambiente quedan definidas en las siguientes normas: la Resolución N°656 de la SAGPyA, establecida el 30 de julio del año 1992; la Resolución N°837 de la SAGPyA, establecida el 9 de setiembre del año 1993 y la Resolución N°289 de la SAGPyA, establecida el 9 de mayo del año 1997. Sin embargo, debido a que la biotecnología agropecuaria se encuentra en una constante evolución, tuvo que efectuarse una actualización de la normativa que regula la liberación de los transgénicos al medio, de esta manera la Resolución N°289 del año 1997, quedó sin efecto a partir del 1 de enero del año 2004, siendo sustituida por la Resolución N°39 del año 2003. Por otro lado, la evaluación de los organismos genéticamente modificados para uso alimentario, está regulada por la Resolución N°412 del SENASA, establecida el 10 de mayo del año 2002, la cual comprende entre otros aspectos, los siguientes: tóxicos naturales, tóxicos de nueva expresión, homología del producto del transgénico con alérgenos conocidos, modificaciones nutricionales, modificación nutricional y caracterización nutricional asignable a métodos de elaboración, modificación de la biodisponibilidad de macronutrientes y/o micronutrientes, y caracterización del alimento modificado desde el punto de vista de su inocuidad para el consumo humano y animal. El objetivo de estas regulaciones en Argentina es garantizar que los organismos transgénicos, con los cuales se llevarán a cabo en primera instancia los ensayos experimentales y los cuales eventualmente obtendrán la autorización para su comercialización, sean seguros para el agro-ecosistema y para el consumo humano y animal.

9.6. Cultivos transgénicos en Brasil

Brasil tiene la segunda mayor superficie cultivada (52,8 millones ha) de cultivos transgénicos a nivel mundial (después de EEUU) y se prevé un crecimiento sustancial en los próximos años. Aproximadamente, el 93%, 82% y 65% de la soya, maíz y algodón plantados en Brasil son transgénicos, respectivamente. Las ventajas que ha tenido la incorporación de cultivos transgénicos para Brasil en términos de productividad han sido considerables, debido a que éstos son más rentables y altamente productivos, lo que se vio reflejado en el crecimiento de un 156% de la producción de granos de Brasil desde el año 1990 al año 2010. Mientras que el área sembrada sólo aumentó en un 27%. El maíz transgénico es responsable del mayor aumento de los ingresos de los agricultores (58%), seguido del de soya (39%) y algodón (3–4%). El rápido aumento en la adopción de los cultivos transgénicos es el

resultado de la comisión técnica encargada de la bioseguridad en Brasil, que es una de las más eficaces a nivel mundial.

El primer cultivo transgénico aprobado comercialmente en Brasil fue la soya transgénica Round-up Ready (RR) en el año 1998, aunque debió ser suspendida inmediatamente en virtud de una decisión judicial a favor del Instituto Brasileño de Defensa del Consumidor. Sin embargo, este cultivo fue oficialmente autorizado el año 2005, como resultado de una decisión del Congreso Nacional, con la aprobación de la Ley de Bioseguridad. Si bien el primer cultivo transgénico fue autorizado el año 1998, los primeros indicios de cultivos ilegales datan de 1996 en la región sur del Brasil. Las plantaciones ilegales de algodón Bollgard (Bt) fueron confirmadas por el Ministerio de Agricultura en el año 2004. La presencia de maíz Round-up Ready (GA21) ilegal en el territorio brasileño fue denunciada en el año 2005. Los ministros de Estado se basaron en estos hechos para iniciar la regulación e institucionalidad relacionada a los cultivos GM.

En la actualidad, más de 50 eventos transgénicos están autorizados para su comercialización en este país, dos de los cuales (una soya tolerante a la imidazolinona y un frijol resistente al virus del mosaico dorado) son el resultado directo de la tecnología nacional y del sector público. El maíz se convirtió en el cultivo con mayor número de características transgénicas liberados en Brasil (29 eventos), seguido de algodón (12 eventos) y soya (7 eventos). En su mayoría los eventos son de resistencia a herbicida o al ataque de insectos, o una combinación de estas dos características.

9.7. Cultivos transgénicos en Chile

Chile es un país clave para proveer semillas transgénicas de contraestación a países del hemisferio norte, siendo el mayor exportador de semillas transgénicas del hemisferio sur. En el país está permitido y regulado el uso de cultivos transgénicos para la producción de semillas con fines de exportación, destinados principalmente como servicios de contraestación y con fines de investigación de campo. La evolución de la superficie sembrada con semillas transgénicas en Chile varía según la demanda de los mercados de destino de la semilla transgénica producida. En la temporada 2019/2020 hubo 14.336 hectáreas destinadas a semillas GM, y en la temporada 2012/2013 se alcanzó un máximo de 35.909 hectáreas. Si países del hemisferio norte, como EEUU, tienen una temporada con altos rendimientos de producción agrícola, entonces las compañías solicitarán una menor cantidad de semillas a los países del hemisferio sur que los abastecen en periodos de contraestación. Por el contrario, cuando factores ambientales como la sequía y el ataque de los insectos afectan negativamente los rendimientos de producción agrícola en países del hemisferio norte, entonces la demanda de la producción de semillas transgénicas en países como Chile aumenta.

Chile es uno de los actores más importantes del mundo para la producción regular de semillas, tanto transgénicas y no transgénicas y para la producción de contraestación. A nivel mundial, según información de la Federación Internacional de Semillas (ISF por sus siglas en inglés) cada año Chile aparece entre los 10 mayores exportadores de semillas en términos de valor. En este contexto, en la temporada 2012/2013, Chile se ubicó quinto y exportó más de US$650 millones. Todo esto gracias a la coexistencia entre las actividades de producción de semillas transgénicas y no transgénicas. Desde los inicios de la producción de transgénicos en Chile en el año 1987, las principales semillas producidas han sido maíz, soya y colza, entre otros cultivos transgénicos sembrados a un nivel significativamente inferior (Figura 9.3).

Durante las últimas cinco temporadas, el 100% de la producción de semilla de soya en Chile, el 81% de la colza y el 61% del maíz, respectivamente, han sido semillas transgénicas. Además, debido al marco regulatorio para las semillas transgénicas junto con las ventajas geográficas y climáticas, el sector privado ha invertido fuertemente en programas de investigación para semillas transgénicas. Por ejemplo, la instalación de las empresas multinacionales y chilenas en el Valle de Azapa (Arica), que tienen el objetivo de construir las instalaciones más modernas de su tipo en América del Sur alcanzó la suma cercana a US $ 46 millones en inversiones sólo en el año 2009.

El Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) lleva a cabo un análisis de riesgos obligatorio para cada OGM sin antecedentes de uso previo en el país, a fin de poder otorgar una autorización de siembra con medidas de bioseguridad. Este proceso se lleva a cabo "caso a caso" teniendo siempre en cuenta las particularidades de la localidad donde se vaya a realizar la siembra. En este análisis se consideran los genes introducidos en el OGM y las proteínas que estos producen, la historia de uso de estas últimas, de qué organismo provienen, en qué órganos de la planta se producen y la estabilidad genética de la característica introducida. Desde el punto de vista agronómico, se compara el OGM con su par convencional, considerando aspectos morfológicos y fisiológicos, su potencial de sobrevivir como maleza, la producción y viabilidad del polen, y la posibilidad de transferencia de genes a plantas silvestres. También se estudia el posible efecto del cultivo y de las proteínas que producen los genes introducidos sobre distintos organismos, y se analiza la degradabilidad de las proteínas en el suelo. Estos estudios permiten concluir si un OGM es seguro y si es equivalente a su par convencional, salvo en la característica introducida.

Para realizar siembras de OGM con medidas de bioseguridad, el solicitante debe presentar al SAG una solicitud en la cual especifique el objetivo de la siembra, la especie y la modificación genética asociada, y el lugar de depósito del material, el cual también debe haber sido aprobado previamente por el SAG. Al autorizar la siembra de un OGM, el SAG emitirá una resolución con las medidas de bioseguridad que se deben cumplir. Desde la importación hasta la exportación o destrucción del OGM, el SAG mantendrá una completa trazabilidad del material. Aparte de lo anterior, el SAG debe autorizar, a través de la emisión de otra resolución, la importación del OGM específico hasta el fin de un año calendario. También se verifica si el OGM cuenta con autorizaciones previas en el país y el estado de avance de su desarrollo. Si al fin del año calendario existiesen saldos de semillas transgénica que se quieran sembrar para un nuevo año calendario, el interesado debe renovar los permisos correspondientes con el SAG.

Todos los predios con OGM son registrados por el SAG para así fiscalizar el cumplimiento de las medidas de bioseguridad establecidas caso a caso. Se verificará el correcto manejo de un OGM en las etapas de siembra, cosecha y procesamiento, y también se fiscalizará la presencia de protocolos de limpieza para evitar la propagación involuntaria del OGM.

El SAG cuenta con métodos de detección que permiten corroborar la identificación de los OGM autorizados. Se utilizan pruebas inmunológicas para la detección de proteínas específicas, o pruebas de PCR en tiempo real para la detección de genes de interés o de elementos genéticos como promotores y terminadores.

Para mantener una trazabilidad total una vez cosechada la producción de semillas OGM, los subproductos, desechos y remanentes deben ser destruidos en lugares autorizados por el SAG.

A pesar de la regulación vigente, Chile se encuentra en una situación incierta ya que no existen procedimientos claros para producir cultivos transgénicos dentro del país para uso doméstico. Esta inconsistencia depende en parte del hecho de que la liberación ambiental de cultivos transgénicos para actividades no confinadas, es decir, actividades distintas a la producción de semillas e I+D, está dentro del alcance de otras regulaciones. Desde el año 2010, la Ley de Medio Ambiente de Chile exige que los organismos transgénicos ingresen al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental para obtener aprobación para su liberación al medio ambiente. Sin embargo, hasta ahora, no se ha promulgado ninguna regulación específica que describa cómo llevar a cabo este proceso, generando un vacío regulatorio.

El Servicio Agrícola y Ganadero, dependiente del Ministerio de Agricultura, mantiene un registro de todos los eventos de cultivos transgénicos que se han sembrado en el país. Entre los años 2009 y 2018, se autorizaron 1.081 eventos diferentes para ensayos de campo o multiplicación de semillas de cultivos transgénicos. En los últimos 10 años se han sembrado en Chile 937 eventos de maíz, 91 de soya y 53 de colza, al menos una vez. Para poner esto en contexto, hasta el año 2020, en los EE.UU., el principal país productor de cultivos GM, la Administración de Alimentos

y Medicamentos (FDA) había evaluado un total de 185 eventos, donde sólo 45, 21 y 19 de los eventos revisados correspondieron a maíz, soya y colza, respectivamente.

En el año 2018, se comercializaron a nivel global 48 eventos de maíz, 9 de soya y 4 de colza. Todos estos eventos han sido sembrados en Chile con fines de I+D o multiplicación de semillas, al menos una vez en los últimos 10 años, demostrando la relevancia del país en el mundo para el desarrollo de la biotecnología agrícola en el contexto del mejoramiento genético vegetal.

Figura 9.3. *Semillas transgénicas producidas en Chile. Fuente: Sánchez y León (2016)*

9.8. Cultivo de transgénicos en Bolivia

La adopción de la soya y el maíz transgénicos en Bolivia, puede generar US$ 150 millones de ingresos adicionales por año. Basados en la experiencia de 10 años y la investigación sobre el uso de soya resistente al glifosato, que fue el primer cultivo biotecnológico adoptado por este país en el año 2005. En Bolivia, la soya resistente al glifosato ayudó a acumular ahorros de US$ 177 millones entre los años 2005 y 2015. La adopción de la soya resistente al glifosato también permitió aumentar la producción de granos, disminuir las emisiones de dióxido de carbono y ahorrar agua.

9.9. Diferencias y semejanzas entre las regulaciones de bioseguridad de tres países del Cono Sur de Sudamérica respecto a transgénicos

En el Tabla 9.5 se presenta un comparativo de las regulaciones respecto a los transgénicos en tres países del Cono Sur de Sudamérica.

Tabla 9.5. *Comparativo de las regulaciones de transgénicos en tres países del Cono Sur de Sudamérica.*

Características de la regulación	País		
	Chile	Argentina	Brasil
• Ley de bioseguridad.	No	Si	Si
• Autorización de comercialización de productos frescos y/o procesados dentro y/o fuera del país.	Si	Si	Si
• Autorización para la multiplicación de semillas para su comercialización a otros países.	Si	Si	Si
• Autorización para la multiplicación de semillas para su comercialización interna.	No	Si	Si
• Evaluación de riesgos previo a la liberación de transgénicos al ambiente.	Si	Si	Si

Los marcos regulatorios que más se asemejan entre sí son los de Argentina y Brasil, no sólo porque ambos presentan un sistema de regulación estricto que contempla evaluación de riesgos, sino que también, porque ambos países incorporan organismos transgénicos como parte de sus cultivos internos para la alimentación humana y animal. Además, ambos países se posicionan en los primeros lugares de Sudamérica y el mundo en cuanto al cultivo y comercialización de organismos transgénicos. Sin embargo, la regulación de Chile difiere substancialmente de éstas, debido a que el marco regulatorio sumado a ciertos vacíos legales, sólo permite la producción de semillas genéticamente modificadas con fines de exportación e investigación y desarrollo. No obstante, de forma contradictoria, no existe en Chile ninguna restricción para las importaciones de alimentos derivados de organismos genéticamente modificados.

9.10. Nuevas técnicas de mejoramiento (NBTs)

Los países sudamericanos han ido creando y adaptando sus marcos regulatorios para dar cabida a las nuevas técnicas biotecnológicas para el mejoramiento genético (New Plant-Breeding Techniques - NBTs). Argentina fue el primer país a nivel mundial y luego Chile en el año 2017. Brasil, Paraguay y Colombia, en Sudamérica, y Honduras y Guatemala, en Centroamérica, también han implementado enfoques regulatorios favorables al uso de las NBTs. El criterio utilizado se basa en determinar si una variedad vegetal desarrollada con biotecnología moderna (ingeniería genética) contiene o no ADN proveniente de otro organismo. En el caso afirmativo, el producto es considerado un organismo genéticamente modificado (OGM). En el caso contrario, el producto es considerado un vegetal común y corriente y no debe someterse a ninguna regulación de OGM.

Por ejemplo, en Chile, el Servicio Agrícola y Ganadero, perteneciente al Ministerio de Agricultura, evalúa si una variedad obtenida por estas nuevas técnicas es OGM o no. Hasta el año 2020, un total de 8 productos habían sido sometidos al proceso y todos ellos fueron considerados no OGM ya que no contenían ADN proveniente de otro organismo (Tabla 9.6).

Tabla 9.6. *Productos de plantas evaluados y autorizados por el Servicio Agrícola y Ganadero de Chile bajo el marco regulatorio para NBTs.*

Especie	Fenotipo	Metodología
Brassica napus (colza)	Resistencia al desgrane	CRISPR
Brassica napus (colza)	Resistencia al desgrane	CRISP+RTDS
Camelina sativa (camelina)	Composición ácidos grasos	CRISPR
Glycine max (soya)	Composición ácidos grasos	TALEN
Glycine max (soya)	Composición ácidos grasos	TALEN
Zea mays (maíz)	Composición de almidón	CRISPR
Zea mays (maíz)	Tolerancia a déficit hídrico	RdDM
Zea mays (maíz)	Tolerancia a déficit hídrico, aumento rendimiento	RdDM

RdDM; RNA-directed DNA methylation; TALEN: transcription activator-like effector nuclease; CRISPR: clustered regularly interspaced short palindromic repeats; RTDS: Rapid Trait Development System.
Fuente: Sánchez (2020).

10. AGRICULTURA, AVANCES Y NUEVAS TECNOLOGÍAS – DESAFÍOS DEL FUTURO

En un mundo cada vez más cambiante por el aumento de la urbanización, el calentamiento global, los problemas ambientales y la variación de los patrones de vida generan nuevos desafíos para el desarrollo sostenible del planeta. El pesimismo puede propagarse y los problemas pueden parecer insuperables. El mundo de la investigación, sin embargo, mira con optimismo el futuro porque hay oportunidades que se pueden aprovechar para cada uno de estos desafíos.

10.1. Desarrollo agropecuario y forestal - ¿visión a 50 años?

Nuestro manejo del suelo y el impacto medioambiental global de la agricultura son problemáticos, y la gran presión que la población impone sobre el uso de la tierra, el agua y los recursos naturales es uno de los mayores retos del mundo. Para manejar este aspecto, se debe utilizar mejor el conocimiento y las tecnologías disponibles, y hacerlo con precaución y sabiduría. Esto –que comúnmente se denomina "buenas prácticas agrícolas"– debería dominar el pensamiento y la legislación actual, sin importar si los cultivos son transgénicos o convencionales.

Nadie sabe con certeza como serán exactamente los sistemas productivos silvoagropecuarios del futuro en las diferentes regiones del mundo. Se sabe que las condiciones naturales para la producción biológica persistirán y que el nivel de conocimiento sobre cómo utilizarlas mejor será profundizado a través de la investigación y el desarrollo biotecnológico. Para cualquier planta que se cultive en el futuro, las demandas requerirán utilizar la capacidad de las plantas para capturar la luz solar y convertirla eficientemente en el producto cosechable que se desea conseguir, ya que queremos obtener mayor cantidad y calidad de alimentos, fibras, energía y madera de los bosques y

campos, y deseamos aumentar el valor de los productos lo que más sea posible.

Las poderosas herramientas de la biología y genética molecular serán las bases de las tecnologías modernas que se usarán para buscar una solución a los problemas. Tanto los laboratorios del sector privado, como los públicos, pueden contribuir a desarrollar productos más variados y rentables, al mismo tiempo más sostenibles. Las plantas con mayor resistencia a las enfermedades, una mejor competitividad contra las malezas, una mejor capacidad para resistir la sequía o la salinidad y una mejor utilización de los insumos, se incluyen en la cartera de nuevas plantas que se están desarrollando en varios laboratorios alrededor del mundo. Tales características son igualmente importantes para la transición hacia sistemas agrícolas más sostenibles, ya sea que el cultivo de especie esté destinado principalmente a la producción de alimentos o a otros fines. En los diversos proyectos de investigación se aprecia un número creciente de cultivos de especies destinados a producir materias primas en áreas distintas del sector alimentario. El desarrollo tecnológico abre nuevas posibilidades donde otros objetivos de fitomejoramiento serán cada vez más importantes.

El mejoramiento genético de vegetales, basado en la biotecnología moderna, también se realiza en la silvicultura, lo que puede contribuir a incrementar la sostenibilidad y desarrollar nuevos productos. La biotecnología forestal obtiene variaciones y abre la posibilidad de influir, cambiar, fortalecer las características deseadas y mejorar varias especies para cubrir diferentes necesidades. En muchos países, la industria forestal se enfrenta a un gran cambio en el que los productos a granel, como el papel prensa, tienen que ser reemplazados por nuevos productos con un alto valor agregado. El interés es cada vez mayor por la extracción de productos químicos de alto valor, nuevos materiales compuestos, materiales de papel y de construcción más fuertes, así como la generación de biocombustibles obtenidos de la madera. Por lo tanto, el interés está cambiando, es decir, de aumentar la productividad en general, a mejorar genéticamente los árboles “adaptados” con una mezcla de madera ideal para diferentes propósitos o en un concepto de biorefinería, donde se extraen productos con muchos más usos.

Figura 10.1. *¿Debe el procesamiento de las materias primas de la agricultura y la silvicultura poder asumir el rol de la industria petroquímica? Fábricas en la comuna de Örnsköldsvik, Suecia. Fotografía Domsjöfabrikerna / Per Ågren.*

10.2. El fitomejoramiento - una cadena ininterrumpida donde las nuevas tecnologías se basan en las anteriores

El conocimiento de la genética ha significado una revolución biológica que comenzó cuando Gregor Mendel, trabajando con los guisantes, descubrió las bases de las leyes de la herencia. La investigación en mutaciones, la citología, la biometría y otros campos de la ciencia pertenecientes o cercanos a la genética, han contribuido al desarrollo del fitomejoramiento. En los últimos 30 años, el conocimiento de la estructura, el funcionamiento y la regulación de los genes ha sido el foco de interés de los investigadores y el desarrollo está progresando muy rápidamente. Hoy se tiene una idea bastante clara de las funciones de la mayoría de los más de 25,000 genes de una especie modelo para la investigación como es *Arabidopsis*. Por ejemplo, muchos investigadores han encontrado que un gen particular es importante para controlar en qué época del año florece una

planta. La investigación de todo el genoma, o la genómica, y otras disciplinas “ómicas” han aumentado rápidamente con el tiempo. Sin embargo, en los principales cultivos que alimentan al mundo, sólo estamos al comienzo de la secuenciación del genoma. Por cada nuevo conocimiento adquirido, se incrementa la capacidad humana de poder aplicar este conocimiento y modificar el material genético de nuestros cultivos para favorecer a los consumidores. La controvertida tecnología transgénica es hoy en día bastante antigua –se estableció hace más de 30 años. Ahora es posible producir plantas transgénicas “en la cocina de cualquier casa” o en la universidad, incluso en las partes más pobres del mundo y existen nuevos y más sofisticados procedimientos biotecnológicos que se utilizan en el fitomejoramiento.

Ha existido mucho pensamiento innovador y grandes recursos de investigación –incluyendo aquellos con fondos públicos– para el desarrollo de las nuevas biotecnologías en el fitomejoramiento. Con el fin de satisfacer de forma óptima los principales problemas mundiales del futuro, debemos entregarle nuevos conocimientos y nuevas herramientas biotecnológicas al fitomejorador moderno. Sería devastador si las nuevas tecnologías tuviesen costos altos como la tecnología transgénica (véase el capítulo 3). Estos costos sólo podrían ser

Figura 10.2. *Técnicas utilizadas en la historia del fitomejoramiento.*

absorbidos por las grandes empresas multinacionales, que están principalmente interesadas en los mercados de los cultivos comercializados a nivel mundial. El costo de la utilización de las nuevas tecnologías debe mantenerse a un nivel tan bajo para que puedan estar disponibles para las PYMES y con acceso a fondos públicos en la industria como en los países en desarrollo.

El Fitomejoramiento es una disciplina aplicada que está estrechamente vinculada al desarrollo científico. Puesto que el fitomejoramiento moderno comenzó a finales del siglo XIX, nuevos y revolucionarios métodos se han introducido continuamente y enriquecido las herramientas del fitomejorador. Sin embargo, métodos de selección desarrollados a finales del siglo XIX son todavía importantes para el fitomejoramiento actual.

El fitomejoramiento es una actividad que siempre ha estado cerca de la investigación básica en genética y disciplinas adyacentes. Durante un milenio se ha llevado a cabo la fitogenética basada en la ciencia, las nuevas tecnologías han evolucionado, sin que las antiguas metodologías se hayan vuelto obsoletas. Los cruzamientos tradicionales y las selecciones siguen siendo una piedra angular del proceso del fitomejoramiento. La historia nos ha enseñado que ninguna tecnología nueva reemplaza completamente los métodos antiguos validados. A pesar de que el carpintero de hoy tiene acceso, tanto a las sierras circulares como a las máquinas rectificadoras, todavía hay una lija en la caja de herramientas. Al mejorar constantemente los métodos analíticos y hacernos más sofisticados, tenemos herramientas mucho más poderosas para hacer nuestra selección de lo que teníamos hace cientos de años. La frontera entre los métodos antiguos y los más modernos del fitomejoramiento ha sido erradicada y la legislación ya no permite regular esto de una manera razonable.

El estrecho vínculo entre la investigación básica (genética) y la aplicación de sus resultados (fitomejoramiento) permite que los nuevos conocimientos lleguen rápidamente a un uso práctico. Muchas de las investigaciones se financian públicamente y se ponen a disposición de todos mediante una publicación sin restricciones para su lectura. En los últimos años, la investigación

financiada con fondos privados, realizada especialmente por compañías multinacionales y financieramente muy sólidas, ha aumentado significativamente. Los resultados de las investigaciones no suelen estar disponibles y, por lo tanto, no contribuye al desarrollo general del conocimiento. La investigación básica y más aplicada y el desarrollo tecnológico deberían ser accesibles a largo plazo. La única manera de hacer progresar la investigación y la tecnología es que la investigación financiada con fondos públicos en la mejora genética de plantas recupere el terreno que ha perdido con respecto a las grandes compañías multinacionales de biotecnología o semillas en las últimas décadas.

10.3. Estructura de negocio, derecho de obtención vegetal y patente. ¿Barrera u oportunidad?

El fitomejoramiento no sólo se ha revolucionado por su rápido desarrollo tecnológico, sino también a través de su transformación estructural. Anteriormente, la industria era bastante estática con pequeñas empresas, a menudo familiares, institutos estatales y universidades. A partir de la década de los años 80, se produjo un cambio dramático: la industria agroquímica entró en el área del fitomejoramiento, se concedieron licencias y se compraron pequeñas empresas de biotecnología. Esto resultó en la concentración de la agrobiotecnología en un puñado de empresas multinacionales de semillas, especialmente con sede en los Estados Unidos de Norteamérica. Las grandes empresas europeas han reubicado la totalidad o parte de sus negocios en Estados Unidos de Norteamérica, pero todavía hay un gran número de pequeñas y medianas empresas. Situaciones similares también se evidencian en muchos países en desarrollo. La pregunta es si la concentración de empresas continuará y cuántas compañías permanecerán.

La ventaja de crear grandes compañías financieramente fuertes es que tienen los recursos para invertir en su propia y muy costosa investigación, desarrollo tecnológico y pueden ser líderes globales. La desventaja es que tenemos una estructura de negocios parecida a la del monopolio u oligopolio similar a la de la industria farmacéutica. Las empresas pueden establecer la agenda y definir las características con las que trabajarán y en que cultivos generarán mayor rendimiento económico global. El riguroso marco regulatorio con minuciosos estudios, detallados ensayos de campo y la aprobación para poder entrar al mercado, particularmente en Europa, hacen que el desarrollo de nuevas variedades con tecnología transgénica sea realizado sólo por las principales empresas que tienen los recursos para invertir en la obtención y comercialización de las nuevas variedades aprobadas.

La mayoría de las empresas pequeñas que han financiado el fitomejoramiento han invertido en las nuevas tecnologías, pero con escasos recursos financieros de fondos públicos. Esto significa que han alcanzado una posición desventajosa en comparación con las empresas multinacionales. El fitomejoramiento financiado con fondos públicos podría funcionar con características completamente diferentes de mayor valor para los consumidores, una agricultura más respetuosa con el medio ambiente o para enfrentar el cambio climático futuro. Las pequeñas empresas no pueden permitirse invertir en un largo y costoso desarrollo de un material que ni siquiera se use en el mercado. La investigación universitaria está en desventaja con las empresas multinacionales. La investigación biotecnológica en cultivos con pequeñas superficies sembradas está en desventaja para su desarrollo comercial cuando el interés comercial se centra en el maíz y la soya, seguidos por el arroz, con la entrada de China en la escena.

El sistema de reemplazo de nuevas variedades es complicado. Ciertamente, el sistema de la UPOV (derecho de obtentor) ha evolucionado hasta convertirse en un sistema claro y lógico, en el que el obtentor es pagado por sus nuevas variedades, el agricultor tiene derecho a poseer las semillas y la nueva variedad está libremente disponible para investigación y el fitomejoramiento por los competidores. Desafortunadamente, el sistema se ha visto afectado por diferentes formas de patentar, porque unos pocos países tienen diferentes leyes de patentes, así como también por diferentes acuerdos internacionales que limitan el acceso a los recursos genéticos como material esencial para el

fitomejoramiento. La complejidad dilata el proceso para obtener nuevas variedades aprobadas.

Las actuales estructuras de propiedad intelectual, la compleja legislación en muchos países, el costoso sistema de ensayos y el sistema de patentes (muchas veces poco práctico) limitan seriamente nuestras oportunidades futuras para aspirar a una agricultura rentable, respetuosa con el medio ambiente, consciente de la calidad y racional a nivel mundial.

10.4. Riesgos y evaluación de riesgos - un marco regulador complejo y debatible

El desarrollo técnico del fitomejoramiento, como la aplicación de las nuevas metodologías de mutación dirigida, evidencia que el límite entre las distintas etapas del fitomejoramiento 1.0, 2.0 y 3.0 se ha erradicado y la legislación en varios países ya no es capaz de regular este desarrollo de manera razonable. Otros avances en la investigación básica, que aún no se han incorporado como herramienta en el fitomejoramiento, complican aún más este aspecto. Los genes pueden ser, por ejemplo, "espaciados" permitiendo que pequeños pedazos de ARN viajen entre diferentes partes de una planta y afecten la expresión génica en otras partes, producidos por los mecanismos epigenéticos, sin cambiar la secuencia del ADN. Por lo tanto, en algunas plantas transgénicas, se les puede inyectar moléculas de ARN pequeñas y dejarlas que funcionen autónomamente, y así se puede obtener otras características, a pesar de que la secuencia de ADN es idéntica. Esto nos conduce a la pregunta: ¿es ésta una planta transgénica?

Incluso la vieja tecnología desafía a la legislación actual de OGM. Nuevos datos muestran que se puede transferir genes cuando se injertan árboles frutales para su propagación. Una interpretación estricta de la legislación es que un injerto de un árbol de pera en un manzano se enmarcaría bajo la legislación de OGM. La base científica sobre la actual legislación, que no considera estos avances del conocimiento científico, nos lleva a cuestionarla.

No es realista pensar que la evaluación de riesgo de las variedades GM se elimine por completo. Un marco reglamentario debe basarse en decisiones tomadas sobre principios científicos y no sobre decisiones políticas desconectadas de la evaluación empírica del riesgo. En cualquier investigación científica, las referencias pertinentes se deben utilizar correctamente, y cualquier planta transgénica que posea impactos negativos en los seres humanos y el medio ambiente debe ser eliminada. Una condición necesaria para esto es permitir ensayos de campo controlados a gran escala y mantener el proceso transparente y rentable.

Si los que administran las solicitudes para el cultivo de transgénicos se pueden mantener a este nivel, se abren las oportunidades para las pequeñas y medianas empresas y los investigadores con fondos públicos que quieran comercializar sus resultados. Esta manera de actuar rompería el monopolio y conduciría a un rápido desarrollo hacia variedades mejoradas. La cuestión de dónde deben colocarse las fronteras de OGM y no OGM vendrá de la mano del rápido desarrollo que tengan las nuevas tecnologías de fitomejoramiento. Es imposible justificar que una planta esté regulada como un OGM mientras que otra –en todos los aspectos idéntica– no lo sea. En la actualidad existe una gran confusión en la sociedad sobre este tema.

Un problema importante es la naturaleza del principio de precaución. Cuando se aplica a plantas transgénicas, se deben usar dos condiciones básicas. En primer lugar, una interpretación razonable requiere que los riesgos de no hacer nada (es decir, status quo) se comparen con los causados por la nueva tecnología. En segundo lugar, la precaución debe ser aconsejada hasta que se hayan obtenido datos relevantes sobre el riesgo, no después de eso. Casi no hay investigación, que este tan expuesto a la crítica, como los posibles riesgos de las plantas transgénicas, ya que los que toman las decisiones no han aceptado los resultados sin necesidad de más investigación. El principio de precaución se ha convertido en un principio de obstrucción para el uso de cultivos transgénicos en la agricultura en varios países del mundo.

Figura 10.3. *No es razonable que dos plantas que sean idénticas en el más mínimo detalle –y, por lo tanto, no puedan distinguirse– sean consideradas diferentes dependiendo de cómo se hayan generado genéticamente: una según una regulación extremadamente estricta y la otra con ninguna. Esta es la situación actual de la Unión Europea pero no en América del Norte. Esta es una diferencia significativa, lo que significa que un cultivo no considerado como OGM en América del Norte está etiquetado como OGM en la Unión Europea. Fotografía: Patrimonio de Wikimedia.*

10.5. Los beneficios de las tecnologías GM y su estancamiento

Las técnicas de ingeniería genética en los cultivos podrían aportar muchas ventajas a la agricultura. Esto se dijo hace 20 años. Durante diez años, sin embargo, la investigación no ha sido limitada, pero la incapacidad de legislar en los gobiernos no ha permitido que los avances lleguen a la práctica. El arroz rico en vitamina A, las papas resistentes al tizón tardío y los nuevos cultivos resistentes a muchos tipos de insectos son algunas de las solicitudes enviadas para su aceptación y en espera de aprobación en la Unión Europea, algunas solicitudes llevan una década. Aquellos que por diversas razones quieren evitar que se apruebe la comercialización de cultivos transgénicos han tratado de maniobrar sobre las regulaciones y ha generado en algunos casos un camino sin salida, por ejemplo:

- Los críticos quieren ver aplicaciones que brinden beneficios reales al medio ambiente y a los consumidores antes de permitir en la agricultura el uso de plantas GM. Sin embargo, estas aplicaciones nunca pueden mostrarse porque no se aprueban nuevas variedades.
- Los críticos quieren más investigación sobre los riesgos antes de permitir el uso de las plantas GM, pero la investigación de riesgo en los campos de la experimentación no se puede llevar a cabo porque en la mayoría de los países es imposible realizar ensayos de campo o éstos son vandalizados.
- Los críticos no quieren permitir el uso de las plantas GM porque unas pocas empresas las producen, pero las regulaciones hacen muy caro obtener variedades competidoras que sean aprobadas, lo que impide que el oligopolio se rompa.

Hay un número creciente de estudios que demuestran que el comportamiento real de los consumidores en la compra de alimentos GM no corresponde a su actitud escéptica expresada. La participación pública en las discusiones sobre el desarrollo agrícola es también muy importante y se necesita más trabajo para mejorar el diálogo y la transparencia. La comunidad científica debe seguir informando al público y, por otra parte, los investigadores tienen la responsabilidad de comunicarse proactivamente de una manera que sea comprensible para la sociedad en general. Las academias científicas tienen un rol importante que desempeñar en el examen de los resultados de la investigación y proporcionar información clara sobre dónde se puede obtener información confiable.

10.6. ¿Ciencia o no ciencia?

Desde que empezamos a trabajar con la producción sistemática del conocimiento (es decir, la ciencia), la agricultura y la silvicultura han estado fuertemente arraigadas en el desarrollo científico y tecnológico y se han beneficiado de él. Este escenario ha cambiado mucho en los últimos años. El gran potencial de la ciencia moderna debería llevar a que los políticos y otros responsables de la toma de decisiones –a pesar de que otros intentan contrarrestarlo– faciliten el uso de las nuevas oportunidades para los agricultores.

Los círculos políticos en Europa se han unido a las fuerzas opositoras de la ciencia. La resistencia en la Unión Europea nace del proteccionismo, los subsidios agrícolas y la poca flexibilidad en la definición de la agricultura orgánica que involucra a los

OGM. La resistencia a las plantas GM es, en cierto modo, única: cuando los argumentos medioambientales son violados por las realidades económicas, los políticos generalmente escuchan al sector económico. En el año 2013, por ejemplo, las sanciones impuestas a las células solares chinas se introdujeron para proteger a los fabricantes europeos de la competencia, lo que a su vez hace más difícil para Europa reducir sus emisiones de dióxido de carbono. El proteccionismo es siempre difícil de motivar políticamente, pero en el caso de las plantas GM, se ha encontrado una coartada perfecta. Uno puede justificar una exclusión proteccionista o la expulsión de productos agrícolas del resto del mundo, teniendo en cuenta nuestros altos estándares de seguridad alimentaria y cuidado de nuestro medio ambiente. ¿Quién quiere estar en contra de nuestro medio ambiente?

La combinación de estos factores con un escepticismo -básicamente natural- sobre los cambios y lo "antinatural", junto con políticos populistas de todos los colores y una mayor

Figura 10.4. *Cuando no se puede controlar a los organismos nocivos, los agricultores utilizan agro-químicos. Durián, especie considerada como el "rey de las frutas" en el sudeste asiático, es atacado por una enfermedad fúngica causada por Phytophtora palmata y debe ser tratado con la inyección de fungicidas en Tailandia. El mejoramiento genético moderno puede contribuir a superar estos problemas. Fotografía: Archivo Songpol Somsri.*

confianza en las organizaciones ambientales, han formado un frente que la ciencia no logró romper. La consecuencia ha sido la conservación de los métodos de cultivo parcialmente anticuados, que no son tan respetuosos con el medio ambiente como siempre se ha argumentado, así como el aumento de las importaciones de componentes proteínicos en particular, ya que los autoproducidos no pueden competir con los importados. Alrededor del 70% de la alimentación proteica utilizada en la Unión Europea se importa actualmente.

Sin embargo, la aparición de las organizaciones de agricultores que requieren el derecho a utilizar los cultivos transgénicos, así como por los ambientalistas que cuestionan la resistencia de las principales organizaciones ambientales a estos cultivos, hacen que esta situación se esté revisando en la Unión Europea. Junto con el problema de los legisladores para poder definir lo que es una planta genéticamente, el mayor uso de cultivos transgénicos fuera de la Unión Europea y el hecho de que las variedades transgénicas de los cultivos domésticos están siendo desarrolladas por los programas públicos de mejora de cultivos en los países en vías de desarrollo. El argumento de que las empresas multinacionales tienen un monopolio u oligopolio no puede ser utilizado, y, por lo tanto, este problema es cada vez más insostenible. En última instancia, la forma en que los responsables de la toma de decisiones de la Unión Europea lograrán salir de este embrollo y la introducción de un sistema de comercialización que sea eficaz y basado en la ciencia todavía no está claro, pero es una cuestión de tiempo. Si queremos aprovechar plenamente el potencial de la revolución del conocimiento biológico, debemos levantar la estigmatización de las aplicaciones de la ingeniería genética en la agricultura, que ha paralizado durante muchos años la investigación en muchos países del mundo.

Las preguntas sobre cómo se desarrolla un marco regulatorio que no consolide la estigmatización sobre la ingeniería genética, sino que contribuya a la confianza y no a la sospecha, constituye uno de los principales retos actuales en el área de la interconexión entre la ciencia y la sociedad. Dejamos al lector con estas preguntas en el aire para que busque sus propias respuestas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anom. 2017. **Marco Regulatorio**. Ministerio de Agroindustria, Buenos Aires, Argentina. http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/biotecnologia/marco_legal/. Con acceso el 01/02/2022

Aragão, F.J.; Nogueira, E.O.; Tinoco, M.L., & Faria, J.C. 2013. **Molecular characterization of the first commercial transgenic common bean immune to the Bean golden mosaic virus.** Journal of Biotechnology 166, 42–50.

ArgenBio. 2021. **Cultivos Aprobados y Adopción. ArgenBio, Buenos Aires, Argentina**. https://www.argenbio.org/cultivos-transgenicos. Con acceso el 01/02/2022.

Borém, A. y Fritsche-Neto, R. (eds.) 2014. **Biotechnology and plant breeding – Applications and approaches for developing improved cultivars**. Academic Press –an imprint of Elsevier,London, United Kingdom.

Brookes, G. y Barfoot, P. 2016. **GM crops: global socio-economic and environmental impacts 1996-2014**. https://www.pgeconomics.co.uk/pdf/2016globalimpactstudymay2016.pdf. Con acceso el 01/02/2022.

Brown J, Caligari P, Campos H. 2014. **Plant Breeding. 2da Edición.** John Wiley & Sons, ISBN0470658290, 9780470658291.

Burachick, M. 2010. **Experience from use of GMOs in Argentinian agriculture, economy and environment**. New Biotechnology 27, 588–59.

Camarena Mayta, F., Chura Cuquija, J. y Blas Sevillano, R.H. 2014. **Mejoramiento Genético y Biotecnológico de Plantas.** AGROBANCO – Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

CamBioTec. 2003. **La biotecnología en América Latina: Panorama al año 2002**. CamBioTec A.C., Mexico D.F.

Castro, B. 2015. **15 years of genetically modified organisms (GMO) in Brazil: risks, labeling and public opinion.** Agroalimentaria 22, 103–117.

Céleres. 2012. **Os Benefícios Socioambientais da Biotecnologia Agrícola no Brasil: 1996 a 2009**. http://www.celeresambiental.com.br/pdf/Rel_BiotechBenefits_2009_Ambiental.pdf. Con acceso el 01/02/2022

ChileBIO. 2016. **Situación en Chile**. https://www.chilebio.cl/situacion-en-chile-transgenicos/. Con acceso el 01/02/2022

Da Fonseca, M.A.J., Da Silva Wetzel, M.M.V. y Candeira, A.C. 2006. **El estado del arte de los recursos genéticos en las Américas: conservación, caracterización y utilización**. Foro de las Américas para la Investigación y el Desarrollo Tecnológico Agropecuario, San José, Costa Rica. 60 pp.

Debuk, S., Ingelbrecht, I., Heijde, M. y Van Montagu, M. (eds.) 2016. **Innovative farming and forestry across the emerging world: the role of genetically modified crops and trees**. International Industrial Biotechnology Network (IIBN), Gante, Bélgica. https://biblio.ugent.be/publication/8525140/file/8525148.pdf. Con acceso el 01/02/2022.

Echenique V., Rubinstein, C. y Mrongiski, L. (eds.) 2004. **Biotecnología y Mejoramiento Vegetal**. Consejo Argentino para la Información y el Desarrollo de la Biotecnología, Buenos Aires, Argentina.

Elliot, H. 2010. **The strategic role of plant breeding in Uruguay: analysis through an agricultural innovation system framework**. FAO Plant Production and Protection Paper 209. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación, Roma, Italia. http://www.fao.org/3/a-at534e.pdf.

Escobar, G. 2016. **La relevancia de la agricultura en América Latina y el Caribe**. Nueva Sociedad 2016, 1–22. https://static.nuso.org/media/documents/agricultura.pdf. Con acceso el 01/02/2022.

European Network of GMO Laboratories (ENGL). 2020. **Evaluation of the scientific publication: "A Real-Time Quantitative PCR Method Specific for Detection and Quantification of the First Commercialized Genome-Edited Plant"** P. Chhalliyilet al. in: Foods 9, 1245.

Falck-Zepeda, J., Falconí, C., Sampaio-Amstaldem, M.J., Solleiro Rebolledo, J.L., Trigo, E. y Verástegui, J. 2009. **La biotecnología agropecuaria en América Latina y el Caribe: una visión cuantitativa**. IFPRI Documento de Discusión 00860SP. International Food Policy Research Institute, Washington D.C.

FAO 2021. **The State of the World's Plant Genetic Resources for Food and Agriculture**. https://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/seeds-pgr/sow/en/ Con acceso el 01/02/2022

Gabriel, J. 2010. **Estrategias y Perspectivas del Mejoramiento Genético de Papa (*Solanum tuberosum L.*) en Bolivia**. Fundación para la Promoción e Investigación de Productos Andinos, Cochabamba, Bolivia.

Gelape Faleiro F., Rocha Monteiro de Andrade, S. y Bueno dos Reis Junior, F. 2011. **Biotecnologia: estado da arte e aplicações na agropecuária**. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, Brasil.

Gocht A., Consmüller N., Thom F., Grethe H. 2021: **Economic and Environmental Consequences of the ECJ Genome Editing Judgment in Agriculture**. Agronomy 11 (6), 1212. https://doi.org/10.3390/agronomy11061212

Guanella Iriarte, L. 2017. **Impacto socioeconómico y medioambiental en Bolivia a partir de la soya y maíz genéticamente mejorados**. Comercio Exterior 248. Instituto Boliviano de Comercio Exterior, Santa Cruz, Bolivia.

Guimaraes, E., Kueneman, E. y Paganini, M. 2007. **Assessment of the national plant breeding and associated biotechnology capacity around the world**. Crop Science 47, S262–S273.

Hefferon, K. 2015. **Nutritionally enhanced food crops: progress and perspectives**. International Journal of Molecular Sciences, 16(2):3895-3914. http://dx.doi.org/10.3390/ijms16023895.

INIA. 2012. **Catálogo de Nuevas Variedades de Papas: Sabores y Colores para el Gusto Peruano**. Instituto Nacional de Innovación Agraria, Lima, Perú. Disponible en https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/101327 Con acceso el 01/02/2022.

ISAAA. International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications. 2020. **Brief 55: Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2019**. https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/55/default.asp Con acceso 01/02/2022

ISF. 2013. **Exports of Seed for Sowing by Country – Calendar Year 2012**. International Seed Federation, Nyon, Suiza. https://259970.vserv2152.swisslink.ch/wp-content/uploads/2018/03/Seed_Exports_2012.pdf. Con acceso el 01/02/2022.

Izquierdo, J. y De la Riva, G.A. 2000. **Plant biotechnology and food security in Latin America and the Caribbean**. Electronic Journal of Biotechnology 3(1):1-8.

Lassoued R., Phillips P.W.B., Macall D.M., Hesseln H., Smyth S. J. 2021. **Expert opinions on the regulation of plant genome editing**. Plant Biotechnology J. https://doi.org/10.1111/pbi.13597.

Levitus, G., Echenique V., Rubinstein, C., Hopp, E. y Mrongiski, L. (eds.) 2010. **Biotecnología y Mejoramiento Vegetal II**. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina https://www.argenbio.org/recursos/biblioteca?task=download.send&id=14&catid=3&m=0 Con acceso el 01/02/2022.

Lopes, M.A., Gelape Faleiro, F., Ferreira, M.E., Biaggoni Lopes, D., Vivian, R. y Silva Boiteux, L. 2011. **Embrapa's contributions to the development of new plant varieties and their impact in Brazilian agriculture**. Crop Breeding and Applied Biotechnology S2, 31–42.

Marinho, C.L.C. y Minayo-Gomez, C. 2004. **Decisões conflitivas na liberação dos transgênicos no Brasil**. São Paulo em Perspectiva 18, 96–102.

Mera, M. y Ortiz, R. 2011. **Contribución del fitomejoramiento**. Crop & Land 1, 22–27.

Noleppa S., Cartsburg M. 2021: **The socio-economic and environmental values of plant breeding in the EU and for selected EU member states**. HFFA Research Paper 2021. https://hffa-research.com/wp-content/uploads/2021/05/HFFA-Research-The-socio-economic-and-environmental-values-of-plant-breeding-in-the-EU.pdf. Con acceso el 01/02/2022.

Ortiz, R. 2002. **No just seed repositories: a more pro-active role for gene banks**. GeneConserve 1, 21–24.

Ortiz, R. 2010. **Biotechnology-assisted crop genetic improvement for food security and sustainable agriculture: perspectives for the Latin American and Caribbean Region**. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, Roma, Italia. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/abdc/documents/iicaredbio.pdf y agregar al final. Con acceso el 01/02/2022.

Ricroch, A.E. y Hénard-Damave, M.C. 2016. **Next biotech plants: new traits, crops, developers and technologies for addressing global challenges**. Critical Reviews in Biotechnology 36, 1–16.

SAG. 2015. **Protección Agrícola, Unidad Inocuidad y Biotecnología, Registros y Listas**. Servicio Agrícola y Ganadero, Santiago, Chile. http://www.sag.cl/ambitos-de-accion/organismos-geneticamente-modificados-ogm/1354/registros. Con acceso el 01/02/2022.

Sánchez, M.A. 2020. **Chile as a key enabler country for global plant breeding, agricultural innovation and biotechnology.** GM Crops & Food, 11:3, 130-139.

Sánchez, M. y León, G. 2016. **Status of market, regulation and research of genetically modified crops in Chile**. New Biotechnology 33, 815-823. https://www.journals.elsevier.com/new-biotechnology.

Sasson, A. 2005. **Desarrollo y uso seguro de las agrobiotecnologías en las Américas: implicaciones para la modernización de la agricultura y la reducción de la pobreza rural**. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica.

Sevilla Panizo, R. y Ortiz, R. 2010. **El impacto económico de la investigación del CGIAR en el Perú**. Agrum 33, 52–55.

Singer S.D., Laurie J.D., Bilichak A., Kumar S. & Singh J. 2021: **Genetic Variation and Unintended Risk in the Context of Old and New Breeding Techniques**. Critical Reviews in Plant Sciences, 40:1, 68-108, DOI: 10.1080/07352689.2.

Smyth, S.J., McHughen, A., Entine, J. et al. 2021: **Removing politics from innovations that improve food security**. Transgenic Res. https://doi.org/10.1007/s11248-021-00261-y.

Solleiro Rebolledo, J.L. y Castañón Ibarra, R. 2013. I**ntroducción al Ambiente del Maíz Transgénico**. Análisis de Ocho Casos en Iberoamérica. AgroBio México y CambioTec, D.F., México.

Trigo, E.J. 2016. **Veinte Años de Cultivos Genéticamente Modificados en la Agricultura Argentina**. Consejo Argentino para la Información y el Desarrollo de la Biotecnología, Buenos Aires, Argentina. https://www.fiba.org.ar/wp-content/uploads/2016/12/informe20gm.pdf. Con acceso el 01/02/2022.

Trigo, E.J. 2011. **15 years of genetically modified crops in Argentine agriculture**. https://chilebio.cl/wp-content/uploads/2015/09/Quince-años-de-cultivos-transgénicos-en-Argentina-15-Years-of-GM-Crops-in-Argentina-Versión-en-inglés.pdf. Con acceso el 01/02/2022.

Trigo, E.J. y Cap, E. 2003. **The impact of the introduction of transgenic crops in Argentinean agriculture**. AgBioForum 6(3):1. https://agbioforum.org/wp-content/uploads/2021/02/AgBioForum_6_3_87.pdf. Con acceso el 01/02/2022.

Trigo, E. y Cap, E. 2006. **Ten years of genetically modified crops in Argentine agriculture**. Argentine Council for Information and Development of Biotechnology Buenos Aires, Argentina. https://chilebio.cl/wp-content/uploads/2015/09/Ten-years-of-GM-Crops-in-Argentine-Agriculture.pdf. Con acceso el 01/02/2022.

Turnbull C., Lillemo M. and Hvoslef-Eide T.A.K. 2021: **Global Regulation of Genetically Modified Crops Amid the Gene Edited Crop Boom – A Review**. Front. Plant Sci. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.630396.

Vallejo F, Estrada E. 2002. **Mejoramiento genético de plantas. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira**. ISBN 9588095115, 9789588095110.