



# Parte I

## LA BIOTECNOLOGÍA AGRÍCOLA: ¿una respuesta a las necesidades de los pobres?

# Parte I





Sección A: Marco para el debate

# 1. ¿Puede la biotecnología satisfacer las necesidades de los pobres?

## Introducción y panorama general

La biotecnología aplicada a la agricultura y la alimentación, especialmente la ingeniería genética, se ha convertido en el centro de una «retórica de guerra mundial» (Stone, 2002). Los partidarios de la ingeniería genética la aclaman como un instrumento fundamental para hacer frente a la inseguridad alimentaria y la malnutrición en los países en desarrollo y acusan a sus adversarios de «crímenes contra la humanidad» por demorar la aprobación reglamentaria de unas innovaciones que podrían salvar vidas humanas (Potrykus, 2003). Quienes se oponen a ella sostienen que la ingeniería genética provocará una catástrofe ambiental, agravará la pobreza y el hambre y dará lugar a que las empresas se adueñen de la agricultura tradicional y del suministro mundial de alimentos. Acusan a los partidarios de la biotecnología de «engañar al mundo» (Five Year Freeze, 2002). En esta edición de *El estado mundial de la agricultura y la alimentación* se examinan los datos científicos y económicos actualmente disponibles sobre la capacidad potencial de la biotecnología agrícola, y en particular de la ingeniería genética, para satisfacer las necesidades de las personas pobres.

La agricultura del siglo XXI se enfrenta con problemas sin precedentes. En los 30 años próximos habrá que alimentar a

otros 2 000 millones de personas con una base de recursos naturales cada vez más frágil. Más de 842 millones de personas, la mayoría de las cuales viven en zonas rurales de países pobres, sufren hambre crónica, y otros muchos millones padecen carencias de micronutrientes, forma insidiosa de malnutrición causada por la mala calidad de la alimentación habitual o por la falta de diversidad de ésta. La Revolución Verde nos enseñó que una innovación tecnológica –semillas de mayor rendimiento e insumos para hacerlas crecer– puede reportar enormes beneficios a las personas pobres al aumentar sus ingresos y reducir los precios de los alimentos. Este círculo virtuoso de aumento de la productividad, mayor eficiencia, mejora del nivel de vida y crecimiento económico sostenible ha permitido salir de la pobreza a millones de personas (Evenson y Gollin, 2003). Pero son muchos los que permanecen atrapados en la agricultura de subsistencia. ¿Puede llegar la Revolución Genética a quienes se han quedado rezagados?

Al mismo tiempo, una población mundial en vías de rápida urbanización exige a la agricultura una variedad mayor de atributos de calidad, no sólo en lo que respecta a los productos en sí, sino también a los métodos empleados para producirlos. El sector agrícola tendrá que responder a esa exigencia sin recurrir a la fórmula tradicional de aumentar los rendimientos,

### RECUADRO 1 Alcance del presente informe

La biotecnología agrícola abarca una variedad de instrumentos de investigación que emplean los científicos para comprender y manipular la estructura genética de los organismos con miras a su utilización en la agricultura, la ganadería, la silvicultura o la pesca. El concepto de biotecnología es mucho más amplio que el de ingeniería genética; comprende también la genómica y la bioinformática, la selección con ayuda de marcadores, la micropropagación, el cultivo de tejidos, la clonación, la inseminación artificial, el trasplante de embriones y otras tecnologías. Sin embargo, la ingeniería genética, especialmente la aplicada a los cultivos, es el sector de la biotecnología que afecta más directamente a la agricultura en los países en desarrollo y que suscita mayores problemas normativos y preocupaciones en la opinión pública. Es también un sector en que se está

empezando a disponer de un conjunto de datos económicos sobre las consecuencias de la biotecnología para las personas pobres. Por esa razón, aunque en este informe se mencionan brevemente todos los instrumentos y aplicaciones de la biotecnología agrícola, se presta más atención, especialmente en el Capítulo 2, a los cultivos transgénicos y a su repercusión en la población pobre de los países pobres. Será tanto o más difícil que otras aplicaciones de la biotecnología en sectores como la ganadería, la pesca o la silvicultura resuelvan muchos de los problemas para conseguir que las personas pobres se beneficien de los cultivos transgénicos. Para más información acerca del programa de trabajo de la FAO en la esfera de la biotecnología agrícola, véase su sitio Web sobre este tema en la siguiente dirección: <http://www.fao.org/biotech/index.asp?lang=es>

y tomando además en consideración la protección del patrimonio ecológico común, las preocupaciones de los consumidores por la inocuidad y calidad de los alimentos y la mejora de los medios de subsistencia rurales, tanto en el Norte como en el Sur. Tal vez esa retórica de guerra nos está impidiendo mantener un debate más razonable sobre los peligros y oportunidades que ofrece la biotecnología.

Existen indicios alentadores de que la biotecnología (Recuadro 1) puede ayudar a hacer frente a esos retos. La biotecnología permite superar las limitaciones de producción más problemáticas o difíciles de resolver con los métodos de mejoramiento tradicionales. Permite acelerar los programas convencionales de mejoramiento y ofrecer a los agricultores material de plantación libre de enfermedades. Permite crear cultivos resistentes a plagas y enfermedades, en sustitución de productos químicos que son perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana, y ofrece instrumentos de diagnóstico y vacunas que ayudan a combatir enfermedades de los animales de efectos devastadores. Permite mejorar la calidad

nutricional de alimentos básicos como el arroz y la yuca y crear nuevos productos con fines sanitarios e industriales.

Pero la biotecnología no es una panacea. No puede subsanar las deficiencias de la infraestructura, los mercados, la capacidad de mejoramiento, los sistemas de distribución de insumos y los servicios de extensión que obstaculizan todos los esfuerzos por promover el crecimiento agrícola en las zonas pobres y remotas. Puede que algunos de estos problemas sean más difíciles de resolver en el ámbito de la biotecnología que en el de otras tecnologías. Las tecnologías aplicadas a semillas, como la resistencia transgénica a insectos, pueden ser más fáciles de utilizar por pequeños agricultores con escasos recursos que tecnologías complicadas para cultivos que requieren otros insumos o complejas estrategias de gestión. Por otra parte, algunos conjuntos de biotecnologías, especialmente las que se utilizan en los sectores ganadero y pesquero, requieren ciertas condiciones institucionales y administrativas para poder funcionar correctamente, por lo que tal vez no sean



eficaces para los pequeños productores con pocos recursos.

Las preocupaciones que suscitan los cultivos transgénicos en relación con la inocuidad y la reglamentación constituyen un importante obstáculo para los países en desarrollo, porque muchos de ellos carecen del marco reglamentario y la capacidad técnica necesarios para evaluar esos cultivos y responder a las reclamaciones contrapuestas que les acompañan. Aunque la comunidad científica internacional ha determinado que los alimentos obtenidos de cultivos transgénicos que se encuentran actualmente en el mercado pueden ser consumidos sin riesgo, también reconoce que algunas de las nuevas transformaciones en las que intervienen múltiples transgenes pueden requerir procedimientos suplementarios de análisis de riesgos para determinar su inocuidad. No hay consenso entre los científicos en cuanto a los peligros que entrañan los cultivos transgénicos para el medio ambiente, pero sí hay un acuerdo general en que al evaluar estos productos se deben comparar dichos peligros con los que se derivan de la agricultura convencional. También hay un amplio consenso en que los cultivos transgénicos deben ser evaluados caso por caso, como se hace con los productos farmacéuticos, teniendo en cuenta el cultivo, la característica y el sistema agroecológico en cuestión. Puesto que sólo se han evaluado los efectos ecológicos de unos pocos cultivos transgénicos en regiones tropicales, es necesario realizar más investigaciones sobre esta cuestión.

Se están realizando actividades de investigación y desarrollo públicas y privadas en relación con más de 40 cultivos transgénicos en todo el mundo y se están estudiando docenas de innovaciones, pero es evidente que se están dejando de lado los problemas de las personas pobres. A excepción de unas pocas iniciativas aisladas, no hay programas importantes, ya sean del sector público o privado, que aborden los problemas fundamentales de las personas pobres o que se centren en los cultivos y animales de los que éstas dependen. Es necesario un esfuerzo internacional concertado para que se tengan en cuenta las necesidades tecnológicas de las personas pobres y se eliminen los obstáculos a su acceso a las tecnologías.

## Principales enseñanzas del presente informe

La biotecnología –incluida la ingeniería genética– puede beneficiar a los sectores pobres de la población con dos condiciones: que se realicen las innovaciones adecuadas y que los agricultores pobres de los países pobres tengan acceso a ellas de manera rentable. Hasta la fecha esas condiciones sólo se han cumplido en unos pocos países en desarrollo.

La biotecnología debería formar parte de un programa integrado y amplio de investigación y desarrollo agrícolas que dé prioridad a los problemas de las personas pobres. La biotecnología puede complementar, pero no sustituir, la investigación en esferas como la fitogenética, el manejo integrado de plagas y nutrientes, la zoogenética, los piensos y los sistemas de lucha contra enfermedades de los animales.

El sector público –países en desarrollo y desarrollados, donantes y centros internacionales de investigación– debería destinar más recursos a la investigación agrícola, incluida la biotecnología. La investigación del sector público es necesaria para abordar los bienes públicos de los que el sector privado haría caso omiso y estimular la competencia en los mercados de tecnología.

Los gobiernos deberían crear incentivos, instituciones y condiciones propicias para la investigación, el desarrollo y el empleo de la biotecnología agrícola en los sectores público y privado. Se deberían fomentar las asociaciones entre ambos sectores y otras estrategias innovadoras para movilizar la investigación sobre tecnologías y el acceso de las personas pobres a éstas.

Se deberían reforzar y racionalizar los procedimientos reglamentarios para garantizar la protección del medio ambiente y de la salud pública, así como la transparencia, previsibilidad y fundamento científico del proceso. Para fortalecer la confianza de consumidores y productores, es imprescindible que haya una reglamentación idónea: una reglamentación que duplica u obstruye el trabajo resulta costosa y ha de ser evitada.

La creación de capacidad en materia de investigación agrícola y cuestiones reglamentarias relacionadas con la biotecnología debería ser prioritaria

para la comunidad internacional. La FAO ha propuesto un importante programa destinado a proporcionar a los países en desarrollo los conocimientos y aptitudes necesarios para que puedan tomar sus propias decisiones con respecto a la utilización de la biotecnología.

### Resumen del informe

El Capítulo 2 analiza los límites de la biotecnología agrícola y la sitúa en el contexto más amplio de los objetivos de producción, conservación y ordenación que persiguen los investigadores. La mayor parte de las polémicas suscitadas por la biotecnología se centran en los cultivos transgénicos, pero esas innovaciones sólo representan una minúscula fracción de las posibilidades técnicas que ofrece la biotecnología aplicada a la agricultura, la ganadería, la silvicultura y la pesca. La ingeniería genética amplía de manera más precisa instrumentos de mejoramiento utilizados durante decenios a la vez que se desvía radicalmente de los métodos convencionales. Lo que le confiere a la ingeniería genética su enorme potencial y hace que sea tan controvertida es su capacidad para transferir genes superando las barreras entre especies.

El Capítulo 3 recuerda cómo contribuyó la investigación pública a escala nacional e internacional a la creación de las tecnologías que produjeron la Revolución Verde. Por el contrario, la mayoría de las investigaciones sobre cultivos transgénicos están siendo realizadas por empresas transnacionales privadas. Esto tiene importantes consecuencias para el tipo de investigaciones que se están realizando y los productos que se están obteniendo. Las tendencias de la investigación y los datos sobre comercialización confirman que se están dejando de lado los cultivos y las características de interés para las personas pobres. En 2003, seis países (la Argentina, el Brasil, el Canadá, China, los Estados Unidos y Sudáfrica), cuatro cultivos (el maíz, la soja, la nabina/colza y el algodón) y dos características (la resistencia a insectos y la tolerancia a herbicidas) representaban el 99 por ciento de la superficie mundial plantada de cultivos transgénicos. Esos mismos cultivos y características son el

centro de la mayoría de las investigaciones sobre cultivos transgénicos que se están realizando en los sectores público y privado de los países desarrollados y en desarrollo. Una de las principales limitaciones con que se enfrentan los países en desarrollo para adoptar y adaptar las innovaciones biotecnológicas realizadas en otras partes es su falta de capacidad nacional en materia de investigación agrícola.

En el Capítulo 4 se examinan los datos actualmente disponibles sobre los efectos socioeconómicos de la adopción de cultivos transgénicos, especialmente en los países en desarrollo. A excepción de los obtenidos en China, todos los cultivos transgénicos comercializados hasta ahora han sido creados y distribuidos por empresas privadas. Ahora bien, algunos de esos cultivos, especialmente el algodón resistente a insectos, están reportando considerables ganancias económicas a los pequeños agricultores, así como importantes beneficios sociales y ambientales, gracias al cambio en la utilización de productos químicos. Los datos de que se dispone parecen indicar que los pequeños agricultores tienen las mismas probabilidades de beneficiarse de la adopción del algodón transgénico que los grandes productores. También apuntan a que, pese a los temores de que las empresas controlen el sector, los agricultores y consumidores están recibiendo de momento una parte de los beneficios económicos de los cultivos transgénicos mayor que la obtenida por las empresas que los han creado y comercializado. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que estos datos únicamente se refieren a dos o tres años y a un número relativamente pequeño de agricultores de unos pocos países. Puede que estas ganancias a corto plazo no se mantengan cuando un número mayor de agricultores adopten las tecnologías. El tiempo y unos estudios más cuidadosamente concebidos dirán qué beneficios producen los cultivos transgénicos y cómo se distribuyen esos beneficios.

En el Capítulo 5 se analizan las preocupaciones y datos científicos relativos a los cultivos transgénicos y se resumen los puntos en que la comunidad científica internacional ha llegado a un acuerdo. Los científicos han determinado que los productos transgénicos que se encuentran actualmente en el mercado pueden

consumirse sin riesgo, aunque recomiendan su seguimiento constante y coinciden en que productos más recientes y complejos podrían requerir procedimientos suplementarios para determinar su inocuidad. Los posibles efectos de los cultivos transgénicos sobre el medio ambiente suscitan mayores divergencias entre los científicos. Por lo general, éstos están de acuerdo en los tipos de peligros existentes, pero discrepan en cuanto a su probabilidad y gravedad. Hasta la fecha, no se ha observado sobre el terreno ninguno de los principales peligros para el medio ambiente potencialmente relacionados con los cultivos transgénicos. Los científicos coinciden en que cada cultivo transgénico debe ser evaluado por separado, teniendo en cuenta el producto, la característica y el sistema agroecológico en que se distribuirá. También coinciden en que la reglamentación debe tener un fundamento científico, si bien el buen juicio y el diálogo son elementos fundamentales en cualquier marco reglamentario basado en principios científicos. La armonización internacional, por ejemplo a través de la Comisión del Codex Alimentarius (CAC) o de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF), puede atenuar las tensiones internacionales en esta esfera. Los países en desarrollo deben reforzar su capacidad nacional para reglamentar esos cultivos y cumplir sus obligaciones nacionales e internacionales.

En el Capítulo 6 se estudian las posiciones de la opinión pública mundial sobre el empleo de la biotecnología en la agricultura y la alimentación. Aunque se llegue a un acuerdo sobre cuestiones científicas o reglamentarias, la ingeniería genética aplicada a la agricultura y la alimentación no podrá obtener resultados satisfactorios si el público no está convencido de su inocuidad y utilidad. Las opiniones sobre estos temas varían mucho entre países y dentro de ellos, pero un cuidadoso examen de datos de encuestas comparables a nivel internacional revela que en todos los países el público tiene opiniones matizadas acerca de la biotecnología y que establece diferencias entre tecnologías y aplicaciones en función de cómo percibe su utilidad y aceptabilidad. Son muy pocas las personas que adoptan una posición doctrinaria en favor o en contra de todo tipo de biotecnologías. Algunos han propuesto el etiquetado como medio para salvar las diferencias de opinión acerca de la

aceptabilidad de los alimentos transgénicos, ofreciendo a cada consumidor la posibilidad de elegir. Otros sostienen que el etiquetado sólo es apropiado en caso de que el producto –y no sólo el proceso utilizado para producirlo– difiera del obtenido por medios convencionales. Los miembros de la CAC están examinando la importancia del etiquetado para los alimentos transgénicos.

En el Capítulo 7 se analiza el tipo de investigación sobre biotecnología agrícola que es necesario para atender las necesidades de las personas pobres, y en particular de los agricultores pobres de los países pobres. Se trata de la investigación sobre los cultivos de los que obtienen la mayor parte de sus alimentos y medios de subsistencia: arroz y trigo, por supuesto, pero también una variedad de cultivos carentes de interés comercial, como el sorgo, el mijo perla, el guandú, el garbanzo y el maní, que son dejados de lado en gran medida en los programas de investigación sobre productos convencionales o biotecnológicos. La resistencia a condiciones desfavorables de producción, como sequía, salinidad, plagas y enfermedades, así como la mejora del contenido nutricional, son características que revisten especial interés para las personas pobres. En este capítulo se estudian también diversas opciones institucionales e incentivos que podrían promover la investigación pública y privada sobre los problemas que afectan a los pobres.

El Capítulo 8 trata de la necesidad de fortalecer la capacidad de los países en desarrollo y los países con economías en transición. Todos los países deben tener una capacidad amplia y dinámica, a nivel técnico, institucional y de gestión, para poder aplicar de manera satisfactoria y sostenible la biotecnología en el ámbito de la agricultura y la alimentación. Se examinan varias iniciativas internacionales en materia de creación de capacidad, y se llega a la conclusión de que es necesario hacer un esfuerzo mucho mayor si se quiere que todos los países estén en condiciones de tomar sus propias decisiones sobre esas tecnologías en beneficio de sus respectivas poblaciones.

En el Capítulo 9 se sacan las conclusiones básicas del informe y se recomiendan medidas para garantizar que la biotecnología contribuya a satisfacer las necesidades de los sectores pobres de la población.

## 2. ¿Qué es la biotecnología agrícola?

En general, se entiende por biotecnología toda técnica que utiliza organismos vivos o sustancias obtenidas de esos organismos para crear o modificar un producto con fines prácticos (Recuadro 2). La biotecnología puede aplicarse a todo tipo de organismos, desde los virus y las bacterias a los animales y las plantas, y se está convirtiendo en un elemento importante de la medicina, la agricultura

y la industria modernas. La biotecnología agrícola moderna comprende una variedad de instrumentos que emplean los científicos para comprender y manipular la estructura genética de organismos que han de ser utilizados en la producción o elaboración de productos agrícolas.

Algunas aplicaciones de la biotecnología, como la fermentación y el malteado, se han utilizado durante milenios. Otras son

### RECUADRO 2 Definición de la biotecnología agrícola

El Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) define la biotecnología como «toda aplicación tecnológica que utilice sistemas biológicos y organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos» (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, 1992). Esta definición incluye las aplicaciones médicas e industriales, así como muchos de los instrumentos y técnicas habituales en la agricultura y la producción de alimentos.

El Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología del Convenio sobre la Diversidad Biológica define de manera más estricta la «biotecnología moderna» como la aplicación de:

- a) *Técnicas in vitro de ácido nucleico, incluidos el ácido desoxirribonucleico (ADN) recombinante y la inyección directa de ácido nucleico en células u orgánulos, o*
- b) *La fusión de células más allá de la familia taxonómica que superan las barreras fisiológicas naturales de la reproducción o de la recombinación y que no son técnicas utilizadas en la reproducción y selección tradicional.*

(Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, 2000)

El glosario de biotecnología de la FAO define la biotecnología en sentido amplio del mismo modo que el CDB y en sentido estricto como «una variedad de tecnologías moleculares como la manipulación de genes, la transferencia de genes, la tipificación del ADN y la clonación de plantas y animales» (FAO, 2001a).

Las técnicas de recombinación del ADN, también denominadas ingeniería genética o (de manera más corriente, pero menos exacta) modificación genética, consisten en la modificación de la estructura genética de un organismo mediante transgénesis, por la que se transfiere ADN de un organismo o célula (el transgén) a otro sin que haya reproducción sexual. Los organismos modificados genéticamente (OMG) se modifican mediante la aplicación de la transgénesis o de una tecnología de recombinación del ADN por la que se incorpora un transgén en el genoma hospedante o se modifica un gen del hospedante con el fin de cambiar su nivel de expresión. A menudo se utilizan de forma intercambiable los términos «OMG», «organismo transgénico» y «organismo obtenido mediante ingeniería genética», aunque técnicamente no son idénticos. Para los fines del presente informe se utilizan como sinónimos.



más recientes, pero están igualmente consolidadas. Por ejemplo, durante decenios se han utilizado microorganismos como fábricas vivas para la producción de antibióticos destinados a salvar vidas humanas, entre ellos la penicilina, obtenida a partir del hongo *Penicillium*, y la estreptomycinina, obtenida a partir de la bacteria *Streptomyces*. Los detergentes modernos se basan en enzimas producidas por medios biotecnológicos, la producción de queso de pasta dura se basa en gran medida en cuajo producido mediante levaduras biotecnológicas y la insulina humana para los diabéticos se produce actualmente gracias a la biotecnología.

La biotecnología se utiliza para resolver problemas en todos los aspectos de la producción y elaboración agrícolas, incluido el fitomejoramiento para elevar y estabilizar el rendimiento, mejorar la resistencia a plagas, animales y condiciones abióticas adversas como la sequía y el frío, y aumentar el contenido nutricional de los alimentos. Se utiliza con el fin de crear material de plantación de bajo costo y libre de enfermedades para cultivos como la yuca, el banano y las papas y está proporcionando nuevos instrumentos para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades de las plantas y los animales y para la medición y conservación de los recursos genéticos. Se utiliza para acelerar los programas de mejoramiento de plantas, ganado y peces y para ampliar la variedad de características que pueden tratarse. La biotecnología está cambiando los piensos y las prácticas de alimentación de los animales para mejorar la nutrición de éstos y reducir los desechos. La biotecnología se utiliza para diagnosticar enfermedades y producir vacunas contra enfermedades de los animales.

Es evidente que el concepto de biotecnología es más amplio que el de ingeniería genética. De hecho, algunos de los aspectos menos controvertidos de la biotecnología agrícola son en potencia los más importantes y beneficiosos para los pobres. La genómica, por ejemplo, está revolucionando nuestro conocimiento de la forma en que funcionan los genes, las células, los organismos y los ecosistemas, y está abriendo nuevos horizontes para la selección con ayuda de marcadores y

la ordenación de los recursos genéticos. Al mismo tiempo, la ingeniería genética es un instrumento muy eficaz cuyo papel debería ser evaluado cuidadosamente. Si se quiere tomar decisiones sensatas sobre su utilización, es importante comprender en qué modo la biotecnología –y en particular la ingeniería genética– complementa y amplía otros métodos.

En este capítulo se describen brevemente las aplicaciones actuales e incipientes de la biotecnología a la agricultura, la ganadería, la pesca y la silvicultura, con el fin de comprender las propias tecnologías y el modo en que complementan y amplían otros métodos. Hay que subrayar que los instrumentos de la biotecnología son sólo eso: instrumentos, y no fines en sí mismos. Como todo instrumento, han de ser evaluados en el contexto en que se utilizan.

### Comprensión, caracterización y ordenación de los recursos genéticos

Agricultores y pastores han manipulado la estructura genética de las plantas y los animales desde que se inició la agricultura, hace más de 10 000 años. Los agricultores manejaron durante milenios el proceso de domesticación a través de numerosos ciclos de selección de los individuos mejor adaptados. Esta explotación de la diversidad natural en los organismos biológicos ha proporcionado los cultivos, árboles de plantación, animales de granja y peces cultivados actualmente existentes, que a menudo difieren radicalmente de sus antepasados más lejanos (véase el Cuadro 1).

El objetivo de los genetistas modernos es el mismo que el de los primeros agricultores: producir cultivos o animales superiores. El mejoramiento convencional, basado en la aplicación de los principios genéticos clásicos relativos al fenotipo o características físicas del organismo en cuestión, ha logrado introducir en cultivares o razas de animales características procedentes de variedades domesticadas o silvestres afines o de mutantes (Recuadro 3). En un cruzamiento convencional, en el que cada progenitor lega a los descendientes la mitad de su estructura genética, se pueden transmitir características no deseadas junto con las

### RECUADRO 3 Mejoramiento con ayuda de mutaciones inducidas

Las mutaciones espontáneas son el motor «natural» de la evolución y el medio de que se valen los genetistas para domesticar cultivos y «crear» variedades mejores. Sin mutaciones no habría arroz, maíz o cualquier otro cultivo.

A partir del decenio de 1970, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la FAO patrocinaron investigaciones sobre la inducción de mutaciones para impulsar el mejoramiento genético de cultivos alimentarios e industriales con el fin de obtener nuevas variedades mejoradas. Las mutaciones inducidas se producen tratando partes de la planta con mutágenos químicos o físicos y seleccionando a continuación los cambios deseados, con lo que se imitan de hecho las mutaciones espontáneas y se amplía artificialmente la diversidad genética. Por lo general, la naturaleza exacta de las mutaciones inducidas no ha sido motivo de preocupación, independientemente de si las líneas mutantes se utilizaban directamente o como fuente de nuevas variaciones en programas de cruzamiento.

La mutación inducida como ayuda del mejoramiento ha dado lugar a la introducción de nuevas variedades de muchos cultivos como el arroz, el trigo, la cebada, las manzanas, los cítricos, la caña de azúcar y el banano (la base de datos sobre variedades mutantes de la FAO/OIEA contiene más de 2 300 variedades distribuidas oficialmente<sup>1</sup>). La aplicación de la mutación inducida al mejoramiento de cultivos ha tenido enormes consecuencias económicas en la agricultura y la producción de alimentos, actualmente valoradas en miles de millones de dólares EE.UU., y se ha traducido en millones de hectáreas de tierra cultivada. Recientemente se ha observado un resurgimiento de las técnicas de mutación, que han trascendido de su utilización directa en el mejoramiento para ser aplicadas en nuevos campos, como el descubrimiento de genes y la genética de reversión.

<sup>1</sup> Puede consultarse en:  
<http://www-infocris.iaea.org/MVD/>

deseadas, y puede que esas características no deseadas hayan de ser eliminadas a través de sucesivas generaciones de mejoramiento. En cada generación, los descendientes deben ser sometidos a pruebas para determinar tanto sus rasgos de crecimiento como sus características nutricionales y de elaboración. Puede que sean necesarias muchas generaciones antes de encontrar la combinación deseada de características, y que los intervalos sean muy largos, especialmente en el caso de cultivos de plantas perennes como los árboles y algunas especies de animales. Esa selección basada en el fenotipo es por consiguiente un proceso lento y difícil que requiere mucho tiempo y dinero. La biotecnología puede lograr que la aplicación de métodos convencionales de mejoramiento sea más eficaz.

#### Genómica

Los avances más importantes en la biotecnología agrícola se han realizado en el ámbito de las investigaciones sobre la estructura de los genomas y los mecanismos genéticos en que se basan diversas características de importancia económica (Recuadro 4). La disciplina de la genómica, en rápido progreso, está proporcionando información sobre la identidad, la localización, los efectos y las funciones de los genes que afectan a esas características, y estos conocimientos impulsarán cada vez más la aplicación de la biotecnología en todos los sectores de la agricultura. La genómica sienta las bases para actividades posteriores, incluidas nuevas disciplinas como la proteómica y la metabolómica, destinadas a generar conocimientos sobre la estructura de los genes y las proteínas, así como sobre sus

CUADRO 1  
Cronología de la tecnología agrícola

Tecnología	Era	Intervenciones genéticas
Tradicional	Unos 10 000 años a.C.	Las civilizaciones aprovechan la diversidad biológica natural, domestican plantas y animales, comienzan a seleccionar material vegetal para su propagación y animales para su mejoramiento.
	Unos 3 000 años a.C.	Se fabrica cerveza y queso, se fermenta vino.
Convencional	Final del siglo XIX	Gregor Mendel identifica en 1865 los principios de la herencia, sentando las bases para los métodos clásicos de mejoramiento.
	Decenio de 1930	Se obtienen cultivos híbridos comerciales.
	Decenio de 1940 a decenio de 1960	Se aplica la mutagénesis, el cultivo de tejidos y la regeneración de plantas. Se descubre la transformación y la transducción. Watson y Crick descubren en 1953 la estructura del ADN. Se identifican los transposones (genes que se separan y se mueven).
Moderna	Decenio de 1970	Se inicia la transferencia de genes mediante técnicas de recombinación de ADN. Se recurre al aislamiento y cultivo de embriones y a la fusión protoplasmática en la fitogenética y a la inseminación artificial en la reproducción animal.
	Decenio de 1980	La insulina es el primer producto comercial obtenido mediante transferencia de genes. Se recurre al cultivo de tejidos para la propagación en gran escala de plantas y al trasplante de embriones para la producción animal.
	Decenio de 1990	Se aplica la caracterización genética a una gran variedad de organismos. En 1990 se realizan los primeros ensayos de campo de variedades de plantas obtenidas mediante ingeniería genética, que se distribuyen comercialmente en 1992. Se obtienen vacunas y hormonas mediante ingeniería genética y se clonan animales.
	Decenio de 2000	Aparecen la bioinformática, la genómica, la proteómica y la metabolómica.

Fuente: Adaptación de datos tomados de van der Walt (2000) y FAO (2002a).

#### RECUADRO 4 El ADN desde el comienzo

Todos los seres vivos están constituidos por células que son programadas por un material genético denominado ácido desoxirribonucleico (ADN). Sólo una pequeña fracción de la cadena del ADN constituye realmente los genes, que a su vez codifican las proteínas, mientras que la porción restante del ADN está formada por secuencias no codificadoras cuyo papel no se conoce aún con exactitud. El material genético se organiza en pares de cromosomas. Por ejemplo, hay cinco pares de cromosomas en la especie de mostaza *Arabidopsis thaliana*, que ha sido objeto de numerosos estudios. El conjunto completo de cromosomas de un organismo se denomina genoma.

El Proyecto de secuenciación del genoma humano ha proporcionado a la comunidad de investigadores agrícolas no sólo muchas tecnologías conexas que pueden ser aplicadas a todos los organismos vivos, sino también un modelo de colaboración internacional para emprender grandes proyectos de secuenciación del genoma de plantas como *Arabidopsis* y el arroz.

Para actualizar los conocimientos sobre el ADN, la genética y la herencia, véase el sitio Web interactivo [www.dnafromthebeginning.org](http://www.dnafromthebeginning.org), creado por el Laboratorio de Cold Spring Harbor, en los Estados Unidos, donde se ha realizado gran parte de la labor más avanzada en los ámbitos de la genética y la ingeniería genética.

funciones y su interacción. Estas disciplinas intentan comprender de forma sistemática la biología molecular de los organismos con fines prácticos.

También ha progresado rápidamente la elaboración de una gran variedad de tecnologías y equipos para generar y procesar información sobre la estructura y el funcionamiento de los sistemas biológicos. El uso y organización de esa información se denomina bioinformática. Los avances en la bioinformática permiten predecir el funcionamiento de un gen basándose en datos sobre su secuencia: a partir de una lista de los genes de un organismo será

posible construir el marco teórico de su biología. La comparación entre mapas físicos y genéticos y secuencias del ADN de distintos organismos reducirá considerablemente el tiempo necesario para identificar y seleccionar genes potencialmente útiles.

La elaboración de mapas genéticos que indican la localización exacta y las secuencias de los genes ha puesto de manifiesto que incluso genomas relativamente distantes comparten rasgos comunes (Recuadro 5). La genómica comparada ayuda a comprender muchos genomas tomando como base el estudio intensivo de unos pocos de ellos. Por ejemplo, la secuencia del genoma del

#### RECUADRO 5 La importancia de la sintenia

*Mike Gale*<sup>1</sup>

La sintenia es la conservación o coherencia del contenido de genes y su orden en los cromosomas de diferentes genomas de plantas. Hasta bien entrado el decenio de 1980, los científicos suponían que cada planta tenía su propio mapa genético. Sólo cuando estuvieron en condiciones de elaborar los primeros mapas moleculares, utilizando una técnica denominada «polimorfismo de longitud de los fragmentos de restricción» (PLFR), empezaron a percatarse de que las especies afines tenían mapas genéticos notablemente similares. Los primeros experimentos demostraron la conservación, durante millones de años de evolución, de las relaciones de sintenia entre la papa y el tomate por lo que respecta a las plantas latifoliadas y entre los tres genomas del trigo planificable por lo que respecta a las gramíneas. Más tarde los científicos pudieron demostrar la existencia de las mismas similitudes en los genomas del arroz, el trigo y el maíz, que estaban separados por unos 60 millones de años de evolución. El diagrama resume esta investigación y muestra que el 70

por ciento de los alimentos del mundo están vinculados en un único mapa. Los 12 cromosomas del arroz pueden ser alineados con los diez cromosomas del maíz y los siete cromosomas básicos del trigo y la cebada de manera que todo radio que se trace en torno a los círculos pase por diferentes versiones, conocidas como alelos, de los mismos genes.

El descubrimiento de la sintenia ha tenido una enorme repercusión en el modo de concebir la fitogenética. Los estudios evolutivos tienen aplicaciones evidentes; por ejemplo, las flechas blancas en los círculos del trigo y el maíz describen traslocaciones evolutivas de los cromosomas de grupos de gramíneas como *Pooideae* y *Panicoideae*. Hay muchas posibilidades de predecir la presencia y localización de un gen en una especie partiendo de lo que se sabe de otra. Ahora que se dispone de la secuencia completa del ADN del arroz, será posible identificar y aislar los principales genes de especies cuyo genoma plantea problemas, como el trigo y la cebada, prediciendo que los mismos genes estarán presentes en el mismo orden que en el arroz. Recientemente se han aislado de ese modo los principales genes de la resistencia a enfermedades y la tolerancia a suelos ácidos de la

<sup>1</sup> Mike Gale es Vicedirector del Centro John Innes de Norwich (Reino Unido).

arroz es útil para estudiar los genomas de otros cereales con los que comparte rasgos en función de su grado de afinidad, y los genomas del ratón y del paludismo proporcionan modelos para otros animales y algunas de las enfermedades que les afectan. Ahora se dispone de modelos para especies de casi todos los tipos de cultivos, animales y enfermedades, y el conocimiento de sus genomas está aumentando rápidamente.

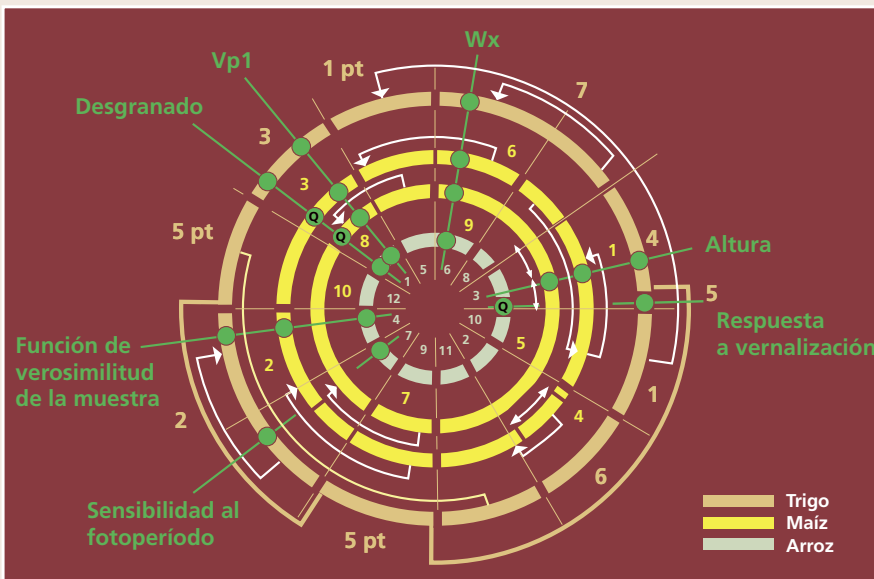
**Marcadores moleculares**

Una información fiable sobre la distribución de la variación genética es una condición necesaria para que los programas de

selección, mejoramiento y conservación sean eficaces. La variación genética de una especie o población puede ser evaluada sobre el terreno o mediante el estudio de marcadores, moleculares o de otro tipo, en un laboratorio. Si se quiere obtener resultados fiables, hay que combinar los dos métodos. Los marcadores moleculares son secuencias identificables de ADN que se encuentran en determinados lugares del genoma y que están relacionadas con la herencia de una característica o de un gen vinculado a ésta. Se pueden utilizar marcadores moleculares para a) proceder al mejoramiento con ayuda de marcadores, b) conocer y conservar los

cebada y el centeno. El conocimiento de la sintenia permite a quienes practican el fitomejoramiento acceder, por ejemplo, a todos los alelos de todos los cereales, y no sólo de las especies en las que están trabajando. Un buen ejemplo de ello es la transferencia al arroz de los genes del enanismo del trigo que hizo posible la Revolución Verde. En esos experimentos se localizó el gen en el arroz por sintenia y seguidamente se aisló y se modificó mediante la alteración de la secuencia del ADN que caracterizaba a los genes del

trigo antes de sustituir el gen modificado en el arroz. Este método puede aplicarse a cualquier gen de cualquier cereal, incluidos los que, por carecer de interés comercial, no han atraído las mismas inversiones en investigación que se han destinado a los tres principales –el trigo, el arroz y el maíz– en el siglo pasado. Lo más importante es, sin embargo, que actualmente existe la posibilidad de combinar los conocimientos sobre bioquímica, fisiología y genética y transferirlos de un cultivo a otro por medio de la sintenia.





## RECUADRO 6

**Los marcadores moleculares y la selección con ayuda de marcadores aplicados al mijo perla en la India***Tom Hash<sup>1</sup>*

El mijo perla es un cereal destinado al consumo humano y a la obtención de paja que se cultiva en las zonas más cálidas y áridas de África y Asia, donde se practica la agricultura de secano. Su comportamiento genético es similar al del maíz. Las variedades de los agricultores tradicionales se polinizan libremente y mediante exogamia, por lo que cambian continuamente. Se han obtenido variedades híbridas genéticamente uniformes que tienen un rendimiento potencial superior pero son más vulnerables a una enfermedad llamada mildiú. En la India, hay unos 9 millones de hectáreas plantados de mijo perla, y más del 70 por ciento de esta superficie está sembrada con esos cultivares híbridos. Desde que llegaron a los campos de la India los primeros híbridos de mijo perla a finales del decenio de 1960, todas las variedades más difundidas entre los agricultores han acabado por sucumbir a las epidemias

<sup>1</sup>Tom Hash es Científico Superior (genética molecular) del ICRISAT, en Patancheru, Andhra Pradesh (India).

de mildiú. Lamentablemente, cuando los agricultores más pobres de una región se deciden a adoptar una determinada variedad, los días de ésta suelen estar contados.

El Instituto Internacional de Investigación de Cultivos para las Zonas Tropicales Semiáridas (ICRISAT) deseaba reducir los riesgos que entrañaba la adopción de híbridos de mijo perla de alto rendimiento y prolongar la vida útil de esas variedades, especialmente para los productores más pobres. La biotecnología ayudó a conseguirlo. Gracias a los instrumentos del Centro John Innes y a la ayuda del Programa de investigación sobre ciencias agrícolas del Departamento para el Desarrollo Internacional, se elaboraron y aplicaron instrumentos basados en la genética molecular para el mijo perla. Se levantó un mapa de las regiones genómicas del mijo perla que controlan la resistencia al mildiú, el rendimiento potencial en paja y el rendimiento en grano y paja en condiciones de sequía. Seguidamente los genetistas utilizaron métodos convencionales de mejoramiento y selección con ayuda de marcadores para

recursos genéticos y c) verificar genotipos. Estas actividades son fundamentales para el mejoramiento genético de cultivos, especies arbóreas forestales, animales y peces.

**Mejoramiento con ayuda de marcadores**

Se puede recurrir a mapas de los vínculos genéticos para localizar y seleccionar genes que influyen en características de importancia económica en animales o plantas. Las posibles ventajas de la selección con ayuda de marcadores son mayores en el caso de las características que están controladas por muchos genes, como el rendimiento en frutos, la calidad de la madera, la resistencia a enfermedades, la producción de leche y carne o la grasa corporal, y cuya medición es difícil, requiere mucho tiempo o resulta costosa.

También se pueden utilizar marcadores para introducir de manera más rápida o eficaz nuevos genes de una población en otra, por ejemplo cuando se desea introducir en variedades modernas de plantas genes de especies silvestres afines. Cuando la característica deseada se encuentra en la misma especie (como en el caso de dos variedades de mijo; véase el Recuadro 6), es posible transferirla con los métodos tradicionales de mejoramiento, utilizando marcadores moleculares para seguir el rastro del gen deseado.

**Medición y conservación de la diversidad genética**

La utilización de marcadores moleculares para medir la magnitud de la variación a

transferir varias regiones genómicas que confirieron mayor resistencia al mildiú a las dos líneas parentales endógamas seleccionadas del híbrido popular HHB 67. A continuación se recurrió a la selección con ayuda de marcadores para obtener dos nuevas variedades –ICMR 01004 e ICMR 01007– con dos bloques de genes diferentes de resistencia al mildiú.

Esas variedades han dado resultados iguales o superiores a los de sus líneas parentales en cuanto al rendimiento en grano y paja, y mucho mejores en cuanto a la resistencia al mildiú. También conservan varias características favorables, entre ellas la masa de 1 000 granos, la longitud de la panícula, la altura de la planta y la resistencia a la roya. Recientemente se han realizado ensayos con híbridos basados en cruzamientos de ICMR 01004 e ICMR 01007 en los estados de Gujarat, Rajastán y Haryana, en el marco del Proyecto coordinado panindio de mejoramiento del mijo perla. En 2002 se había llevado a cabo, con resultados satisfactorios, una evaluación de estos híbridos que había demostrado su superioridad marginal en cuanto al rendimiento en grano y su

resistencia al mildiú considerablemente mayor que la del HHB 67, manteniendo al mismo tiempo la maduración temprana que ha contribuido a su amplia aceptación.

Al menos uno de estos dos híbridos podría ser distribuido para sustituir al HHB 67 antes de que éste sucumba a una epidemia de mildiú (como sin duda sucederá). Dado que el cultivo del HHB 67 está muy extendido entre los agricultores pobres de la India, si mediante su sustitución oportuna pudiera evitarse una de esas epidemias al menos un año, el ahorro en pérdidas superaría al valor total de la ayuda del Departamento para el Desarrollo Internacional para financiar la investigación sobre la elaboración y aplicación de las herramientas de genética molecular para el mijo perla (3,1 millones de libras esterlinas hasta la fecha). Todos los beneficios que se obtengan en el futuro de esta investigación del ICRISAT, de sus asociados del Reino Unido que reciben ayuda del Departamento para el Desarrollo Internacional y de sus asociados de la India que colaboran en los programas nacionales podrán entonces considerarse como ganancias para la sociedad.

nivel genético, dentro de las poblaciones y entre ellas, es de gran ayuda para orientar las actividades de conservación genética y crear poblaciones útiles para la reproducción de cultivos, animales, árboles y peces. Estudios realizados aplicando estas técnicas a peces y especies arbóreas forestales han revelado altos niveles de variación genética dentro de las poblaciones y entre ellas. Las especies de animales se caracterizan por un alto grado de variación genética dentro de las poblaciones, mientras que los cultivos muestran un mayor grado de variación entre especies. Los datos obtenidos mediante otros métodos, por ejemplo la observación sobre el terreno, no suelen proporcionar esa información o son sumamente difíciles de recopilar.

Los marcadores moleculares se utilizan

cada vez más para estudiar la distribución y las pautas de la diversidad genética. Por ejemplo, encuestas mundiales indican que el 40 por ciento de las razas de animales domésticos restantes están amenazadas de extinción. La mayoría de esas razas están presentes únicamente en países en desarrollo, y con frecuencia se sabe poco de ellas o de las posibilidades de mejorarlas. Tal vez contengan genes valiosos que confieran capacidad de adaptación o de recuperación frente a condiciones desfavorables, como tolerancia al calor o resistencia a enfermedades, y que puedan ser útiles para las generaciones futuras. Las biotecnologías modernas pueden ayudar a contrarrestar las tendencias a la erosión genética en todos los sectores de la agricultura y la alimentación.

### Verificación de genotipos

Los marcadores moleculares han sido ampliamente utilizados para la identificación de genotipos y la caracterización genética de organismos. Se ha recurrido a la caracterización genética en proyectos avanzados de mejoramiento de árboles en los que era esencial la identificación correcta de los clones para programas de propagación en gran escala. Se ha recurrido a los marcadores moleculares para identificar especies marinas amenazadas que son capturadas inadvertidamente durante la pesca o intencionadamente de manera ilegal. La verificación de genotipos es ampliamente utilizada para realizar pruebas de parentesco de animales domésticos y seguir el rastro de productos animales en la cadena alimentaria remontándose hasta la explotación y el animal de origen.

### Mejoramiento y reproducción de cultivos y árboles

Además de la selección con ayuda de marcadores, descrita anteriormente, se han utilizado diversas biotecnologías para mejorar y reproducir cultivos y árboles. A menudo estas tecnologías se combinan entre sí y con métodos convencionales de mejoramiento.

### Cultivo de células y tejidos y micropropagación

La micropropagación consiste en tomar pequeñas secciones del tejido de una planta o estructuras enteras, como yemas, y cultivarlas en condiciones artificiales para regenerar plantas completas. La micropropagación es especialmente útil para conservar plantas valiosas, mejorar especies en aquellos casos en que es difícil hacerlo por otros medios (como sucede con muchos árboles), acelerar el mejoramiento de plantas y obtener abundante material vegetal para la investigación. Por lo que respecta a los cultivos y especies hortícolas, la micropropagación es actualmente la base de una amplia industria comercial en la que participan cientos de laboratorios en todo el mundo. Además de sus ventajas en cuanto a la rapidez de la multiplicación, la micropropagación puede utilizarse para generar material de plantación libre de enfermedades (Recuadro 7), especialmente si se combina con equipo de diagnóstico para la detección de enfermedades. Ha habido intentos de utilizar más ampliamente la micropropagación en la silvicultura. En comparación con la propagación vegetativa por estacas, la micropropagación ofrece tasas superiores de multiplicación que permiten una difusión más rápida del material de

#### RECUADRO 7

#### Micropropagación de bananos libres de enfermedades en Kenya

El banano se cultiva por lo general en países en desarrollo, donde es una fuente de empleo, ingresos y alimentos. La producción de banano está disminuyendo en muchas regiones debido a problemas de plagas y enfermedades que no pueden resolverse satisfactoriamente mediante la lucha agroquímica en razón de su costo y de sus efectos negativos en el medio ambiente. Estos problemas se agravan porque el banano se reproduce por clonación, de manera que el uso de plantas madre enfermas produce vástagos enfermos.

La micropropagación constituye un medio para regenerar plantones de banano libres de enfermedades a partir de tejidos sanos. En Kenya, se ha logrado

cultivar tejido de yemas terminales.

La yema terminal original se somete a un tratamiento térmico para destruir los organismos infecciosos y seguidamente se utiliza a lo largo de muchos ciclos de regeneración para producir plantas hija. Con una sola sección de tejido se pueden producir hasta 1 500 nuevas plantas a lo largo de diez ciclos de regeneración.

La micropropagación del banano ha tenido una enorme repercusión en Kenya y otros muchos países, al contribuir a mejorar la seguridad alimentaria y la generación de ingresos. Tiene la ventaja de ser una tecnología relativamente barata y fácil de aplicar y también la de reportar importantes beneficios para el medio ambiente.

plantación, aunque los costos más altos y la disponibilidad limitada de los clones deseados impiden que se adopte más ampliamente.

### Selección *in vitro*

La selección *in vitro* entraña la selección de germoplasma mediante la aplicación de una presión selectiva específica al cultivo de tejidos en condiciones de laboratorio. Muchas publicaciones recientes han dado a conocer la provechosa correlación existente entre las respuestas *in vitro* y la expresión sobre el terreno de las características deseadas, en la mayoría de los casos resistencia a enfermedades, en plantas cultivadas. También se han obtenido resultados satisfactorios por lo que respecta a la tolerancia a herbicidas, metales, salinidad y bajas temperaturas. En cuanto a los criterios de selección más importantes para las especies arbóreas forestales (en particular vigor, forma del tronco y calidad de la madera), la escasa correlación con las respuestas obtenidas sobre el terreno sigue limitando la utilidad de la selección *in vitro*. Sin embargo, este método puede ser de interés en programas forestales de selección previa en función de la resistencia a las enfermedades y la tolerancia a la salinidad, las heladas y la sequía.

### Ingeniería genética

Cuando la característica deseada está presente en un organismo que no es sexualmente compatible con el hospedante, puede ser transferida mediante ingeniería genética. Para las plantas, el método al que se recurre con más frecuencia en la ingeniería genética es el que utiliza como vector la bacteria del suelo *Agrobacterium tumefaciens*. Los investigadores insertan el gen o genes deseados en la bacteria y seguidamente infectan a la planta hospedante. Los genes deseados se transmiten a ésta junto con la infección. Este método se utiliza principalmente con especies dicotiledóneas como el tomate y la papa. Algunos cultivos, en particular las especies monocotiledóneas como el trigo y el centeno, no son naturalmente susceptibles de transformación por medio de *A. tumefaciens*, aunque recientemente se ha utilizado con éxito el método para transformar trigo y otros cereales. La técnica

aplicada con más frecuencia a esos cultivos consiste en revestir el gen deseado con partículas de oro o tungsteno y utilizar un «lanzagenes» para conseguir que el gen penetre a gran velocidad en el organismo hospedante.

Existen tres formas de obtener cultivos modificados genéticamente: a) mediante «transferencia entre organismos distantes», en que se transfieren genes entre organismos pertenecientes a diferentes reinos (por ejemplo, de bacterias a plantas); b) mediante «transferencia entre organismos cercanos», en que se transfieren genes de una especie a otra del mismo reino (por ejemplo, de una planta a otra); y c) mediante un «retoque», en que se manipulan genes ya presentes en el genoma del organismo para modificar el nivel o la modalidad de expresión. Una vez transferido el gen, el cultivo debe ser sometido a una prueba para cerciorarse de que el gen se expresa debidamente y se mantiene estable a lo largo de varias generaciones de mejoramiento. Los resultados de esta selección previa suelen ser más satisfactorios que los del cruzamiento convencional, porque se conoce la naturaleza del gen, se dispone de métodos moleculares para determinar su localización en el genoma y se necesitan menos cambios genéticos.

La mayoría de los cultivos transgénicos plantados hasta la fecha sólo incorporan un número muy limitado de genes destinados a conferir resistencia a insectos o tolerancia a herbicidas (para más información sobre los cultivos transgénicos que actualmente son objeto de investigación y de producción comercial, véase el Capítulo 3). Se han obtenido algunos cultivos transgénicos y algunas características de mayor interés potencial para los países en desarrollo, pero todavía no se han distribuido comercialmente. En el Recuadro 8 se describe un proyecto de investigación para mejorar la tolerancia del trigo al aluminio, problema que afecta a los suelos ácidos de gran parte de América Latina y África. Se están realizando actividades similares para mejorar la tolerancia de las plantas a otras condiciones desfavorables, como la sequía, la salinidad del suelo y las temperaturas extremas.

La mejora nutricional de los cultivos puede contribuir de manera significativa a reducir la malnutrición por carencia de micronutrientes

## RECUADRO 8

**Agricultura en suelos ácidos: mejora de la tolerancia al aluminio en cereales**

Miftahudin,<sup>1,2</sup> M.A. Rodriguez Milla,<sup>2</sup> K. Ross<sup>3</sup> y J.P. Gustafson<sup>3</sup>

El aluminio presente en suelos ácidos limita el crecimiento de las plantas en más del 30 por ciento de todas las tierras de cultivo, principalmente en los países en desarrollo. Hay dos métodos para aumentar la producción agrícola en suelos ácidos. Se puede añadir cal al suelo para aumentar el pH, pero ésta es una medida costosa y temporal. Otra solución es crear cultivares mejorados genéticamente que sean tolerantes al aluminio. Los cultivares de trigo existentes no contienen una variación genética significativa en lo que respecta a la tolerancia al aluminio. Habrá que mejorar la tolerancia del trigo recurriendo al acervo genético de especies afines más tolerantes. Se ha elaborado un mapa de los vínculos genéticos del trigo utilizando los marcadores disponibles para el gen de la tolerancia al aluminio.

El centeno tiene una tolerancia al aluminio cuatro veces superior a la del trigo. Por consiguiente se caracterizó un gen del centeno que controla la tolerancia al aluminio y se utilizaron marcadores del trigo, la cebada y el arroz para establecer una estrecha vinculación, paralela a la

del gen del centeno, y para construir un mapa genético de alta resolución. Se realizaron estudios de la expresión génica de las raíces en el curso del tiempo que únicamente mostraron esa expresión en las raíces del centeno en presencia de aluminio.

Los estudios centrados en el gen de la tolerancia al aluminio son un buen ejemplo de utilización de métodos basados en problemas para integrar instrumentos de genética molecular y mejoramiento con el fin de aumentar la producción de trigo. La utilización de la relación genética (sintenia) entre cereales para obtener marcadores que permitan identificar y caracterizar rasgos con valor ha dado lugar a la aparición de métodos complementarios para aumentar la producción de trigo. Los genetistas pueden utilizar los marcadores para el gen del centeno en programas de mejoramiento con ayuda de marcadores en zonas donde no se pueden cultivar OMG o donde sólo se dispone de instrumentos convencionales de mejoramiento. Además, los métodos transgénicos de mejoramiento del trigo pueden utilizar esos marcadores en clonaciones basadas en mapas para aislar el gen en cuestión. Por último, la utilización de las relaciones sinténicas es una tecnología que permite manipular muchas características con valor añadido para mejorar cultivos de otras especies.

<sup>1</sup> Departamento de Agronomía, Universidad de Misuri, Columbia (Estados Unidos).

<sup>2</sup> Departamento de Biología, Universidad Agrícola de Bogor, Bogor (Indonesia).

<sup>3</sup> Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Dependencia de Investigación Fitogenética, y Departamento de Agronomía, Universidad de Misuri, Columbia (Estados Unidos).

en los países en desarrollo. La aplicación conjunta de diversas biotecnologías puede impulsar el bioenriquecimiento, es decir la obtención de alimentos con un contenido nutricional mejorado. Son necesarios análisis genómicos y mapas de los vínculos genéticos para identificar los genes responsables de la variación natural del nivel de nutrientes en

alimentos comunes (Cuadro 2). Esos genes pueden ser transferidos seguidamente a cultivares conocidos por medio de técnicas convencionales de mejoramiento y de la selección con ayuda de marcadores o, si no hay suficiente variación natural dentro de una sola especie, por medio de la ingeniería genética. Por ejemplo, se están utilizando



## CUADRO 2

**Variación genética de las concentraciones de hierro, cinc, beta-caroteno y ácido ascórbico presentes en el germoplasma de cinco alimentos básicos (peso en seco)**

	(mg/kg)			
	Hierro	Cinc	Beta-caroteno <sup>1</sup>	Ácido ascórbico
<b>ARROZ</b>				
Pardo	6-25	14-59	0-1	–
Elaborado	1-14	14-38	0	–
<b>YUCA</b>				
Raíz	4-76	3-38	1-24 <sup>2</sup>	0-380 <sup>2</sup>
Hojas	39-236	15-109	180-960 <sup>2</sup>	17-4200 <sup>2</sup>
<b>FRIJOLES</b>	34-111 <sup>1</sup>	21-54	0	–
<b>MAÍZ</b>	10-63	12-58	0-10	–
<b>TRIGO</b>	10-99 <sup>3</sup>	8-177 <sup>2</sup>	0-20	–

<sup>1</sup> La variación es mucho mayor en el caso de los carotenoides totales.

<sup>2</sup> Peso en fresco.

<sup>3</sup> Incluidas las variedades silvestres afines.

Fuente: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2002.

métodos no transgénicos para aumentar el contenido de proteínas en el maíz, de hierro en el arroz y de carotenos en la batata y la yuca.

Se puede recurrir a la ingeniería genética cuando dentro de una especie no existe suficiente variación natural del nutriente deseado. En el Recuadro 9 se describe el debate suscitado por un proyecto para mejorar el contenido de proteína de la papa mediante ingeniería genética. El famoso arroz dorado transgénico contiene tres genes exógenos –dos del narciso y uno de una bacteria– que producen provitamina A (véase el Recuadro 13, pág. 46). Los científicos han avanzado mucho en su intento de obtener arroz transgénico nutricionalmente mejorado que contenga genes productores de provitamina A, hierro y más proteína (Potrykus, 2003). Se están produciendo otros alimentos nutricionalmente mejorados, como aceites con un contenido menor de ácidos grasos perjudiciales. Además, se están modificando alimentos que con frecuencia producen alergias (camarones, maní, soja, arroz, etc.) para reducir su contenido de compuestos alergénicos.

Un importante factor técnico que limita la aplicación de la ingeniería genética a las especies arbóreas forestales es el bajo grado de conocimiento que existe actualmente acerca del control molecular de

las características más interesantes. Uno de los primeros ensayos con especies arbóreas forestales modificadas genéticamente de que se tienen noticias se inició en Bélgica en 1988 utilizando álamos. Desde entonces, se han notificado más de 100 ensayos relativos a al menos 24 especies de árboles, principalmente especies de las que se obtiene madera. Las características para las que se ha contemplado la modificación genética han sido la resistencia a insectos y virus, la tolerancia a herbicidas y el contenido de lignina. La reducción de la lignina es un valioso objetivo en el caso de las especies de las que se obtiene pasta para la industria papelera, porque permite disminuir la utilización de sustancias químicas en el proceso.

### Mejoramiento y reproducción de ganado y peces

La biotecnología es desde hace tiempo una fuente de innovación para la producción y elaboración en los sectores de la ganadería y la acuicultura, y ha tenido profundos efectos en ambos. Los rápidos avances en la biotecnología molecular y la evolución ulterior de la biología reproductiva han proporcionado nuevos y eficaces instrumentos para seguir innovando.

### RECUADRO 9

#### El «protato»: ¿ayuda para los pobres o caballo de Troya?

Los investigadores de la Universidad Jawaharlal Nehru de la India han obtenido mediante ingeniería genética una papa con un contenido de proteína entre un 33 y un 50 por ciento superior al habitual, incluidas cantidades considerables de todos los aminoácidos esenciales como la lisina y la metionina. La carencia de proteína está muy extendida en la India y la papa es el alimento básico de las personas más pobres.

Esta papa, conocida como «protato», fue creada por un grupo de instituciones benéficas, científicos, organismos públicos y empresas privadas de la India como parte de una campaña de 15 años de duración contra la mortalidad infantil. El objetivo que persigue la campaña es eliminar la mortalidad infantil proporcionando a los niños agua limpia, vacunas y una alimentación mejor.

El protato incluye un gen del amaranto, gramínea con alto contenido de proteínas que es originaria de América del Sur y que se vende mucho en las tiendas occidentales de alimentos. El protato ha sido sometido a ensayos de campo y pruebas para detectar la presencia de alérgenos y toxinas. Faltan probablemente al menos cinco años para su aprobación definitiva por el Gobierno de la India.

Sus defensores, como Govindarajan Padmanaban, bioquímico del Instituto de Ciencias de la India, argumentan que el protato puede dar un fuerte impulso a la nutrición infantil sin peligro de alergia porque tanto la papa como el amaranto

son ya alimentos de amplio consumo.

Tampoco representa una amenaza para el medio ambiente, porque en la India no hay variedades silvestres afines de la papa ni del amaranto, y el protato no entraña cambios en las prácticas habituales de producción de la papa. Por otra parte, no hay que preocuparse de que la tecnología sea controlada por empresas extranjeras, porque el protato ha sido creado por científicos de centros públicos de la India. Teniendo en cuenta esas ventajas, Padmanaban observaba: «A mi juicio sería moralmente indefendible oponerse a él.» (Coghlan, 2003).

Sus detractores, como Charlie Kronick, de Greenpeace, sostienen que el contenido de proteínas de las papas es muy bajo por naturaleza (un 2 por ciento aproximadamente), por lo que, incluso si se duplicara, sólo contribuiría en ínfima medida a resolver el problema de la malnutrición. Afirma que el esfuerzo realizado para obtener el protato ha estado más orientado a lograr la aceptación de la ingeniería genética por la opinión pública que a solucionar el problema de la malnutrición: «La causa del hambre no es la falta de alimentos. Es la falta de dinero efectivo y de acceso a los alimentos. Esos cultivos modificados genéticamente han sido creados para hacerlos más atractivos cuando de hecho la utilidad de su consumo es muy, muy escasa. Resulta muy difícil comprender en qué modo cambiará esto, por sí solo, la situación de la pobreza.» (Charles, 2003).

Tecnologías como la genómica y los marcadores moleculares, anteriormente descritas, son útiles para comprender, caracterizar y ordenar los recursos genéticos tanto en la ganadería y la pesca como en la agricultura y la silvicultura (Recuadro 10). La ingeniería genética es también importante en la ganadería y la pesca, aunque las técnicas difieren y en estos sectores se dispone de otras tecnologías reproductivas. En la presente sección se describen las biotecnologías reproductivas que son

específicas de los sectores ganadero y pesquero.

El objetivo principal de las biotecnologías reproductivas aplicadas a la ganadería es aumentar la eficiencia reproductiva y las tasas de mejoramiento zoogenético. El mejoramiento genético de las razas adaptadas a las condiciones locales es importante para asegurar sistemas sostenibles de producción en la gran variedad de entornos de producción de los países en desarrollo, y esto se conseguirá

## RECUADRO 10

**La situación de los recursos zoogenéticos mundiales**

La FAO ha recibido de sus Estados Miembros el encargo de elaborar y aplicar la Estrategia Mundial para la Gestión de los Recursos Genéticos de los Animales de Granja. Como parte de esta estrategia impulsada por los países, la FAO invitó a 188 países a participar en la preparación del primer informe sobre la situación de los recursos zoogenéticos mundiales, que habrá de concluirse antes de 2006. Hasta la fecha, 145 países han convenido en presentar informes nacionales, de los que se han recibido y analizado 30 (Cardellino, Hoffmann y Templeman, 2003). Estos informes ponen de manifiesto que la inseminación artificial es la biotecnología más utilizada por los países en desarrollo en el sector ganadero. Muchos países solicitan capacitación para ampliar el recurso a esta tecnología, al tiempo que expresan preocupación por el hecho de que a menudo se introduce sin una debida planificación, por lo que podría representar una amenaza para la

conservación de las razas locales. Aunque se menciona la utilización de la técnica de ovulación múltiple seguida del trasplante de embriones (OMTE) y se expresa el deseo de introducirla o ampliarla, no se tienen claros sus objetivos. Todos los países manifiestan el deseo de introducir y promover técnicas moleculares, a menudo como complemento de la caracterización fenotípica. También consideran prioritaria la crioconservación y recomiendan la creación de bancos de genes, aunque la financiación sigue siendo una limitación importante. Cuando se mencionan los OMG de origen animal, suele ser para indicar la falta de reglamentos y directrices adecuados para su producción, utilización e intercambio en su día. Algunos países expresan su preocupación porque las biotecnologías del sector ganadero deberían ser aplicadas, pero no siempre lo son, como parte integrante de una estrategia global de mejoramiento genético.

probablemente mejor mediante una utilización estratégica de intervenciones genéticas y no genéticas. La biotecnología reproductiva aplicada al sector pesquero ofrece la oportunidad de aumentar las tasas de crecimiento de las especies cultivadas, mejorando su ordenación, y limitar el potencial reproductivo de las especies obtenidas mediante ingeniería genética.

#### **Inseminación artificial y ovulación múltiple/trasplante de embriones**

Los avances en la inseminación artificial y la ovulación múltiple seguida del trasplante de embriones (OMTE) han tenido ya una notable repercusión en los programas zoogenéticos de los países desarrollados y de muchos países en desarrollo porque aceleran el proceso de mejoramiento genético, reducen el riesgo de transmisión de enfermedades y aumentan el número de animales que pueden obtenerse de un progenitor superior, que es el macho en el caso de la inseminación artificial y la hembra en el de la OMTE. También ofrecen más

incentivos para la investigación privada en materia de zoogenética y amplían considerablemente el mercado de estirpes progenitoras mejoradas.

En 1998 se realizaron en todo el mundo más de 100 millones de operaciones de inseminación artificial en bovinos (sobre todo ganado lechero, incluidos búfalos), 40 millones en cerdos, 3,3 millones en ovejas y 500 000 en cabras. Estas cifras ponen de manifiesto tanto el mayor rendimiento económico del ganado bovino lechero como el hecho de que el semen de bovinos es mucho más fácil de congelar que el de otros animales. Mientras que en el Asia meridional y sudoriental se efectuaron más de 60 millones de operaciones de inseminación artificial en bovinos, en África se realizaron menos de un millón.

La inseminación artificial sólo es eficaz si las explotaciones agropecuarias tienen acceso a una capacidad técnica, institucional y logística que debe ser mucho mayor que en el caso de que los machos se utilicen directamente con fines reproductivos. Un factor positivo es que

### RECUADRO 11

#### La biotecnología puede librar al mundo de la peste bovina

La peste bovina, que es una de las enfermedades de los animales más devastadoras del mundo, representa una grave amenaza para millones de pequeños ganaderos y pastores que dependen de su ganado para obtener alimentos y medios de subsistencia. Esta enfermedad vírica, que afecta al ganado bovino, incluidos los búfalos, los yaks y las especies silvestres afines, acabó con cerca del 90 por ciento de todos los bovinos del África subsahariana en el decenio de 1890. Entre 1979 y 1983, una epidemia causó la muerte de más de 100 millones de cabezas de ganado en África, más de 500 000 sólo en Nigeria, ocasionando pérdidas estimadas en 1 900 millones de dólares EE.UU. Asia y el Cercano Oriente se han visto también muy afectados por esta enfermedad.

Actualmente, el mundo está prácticamente libre de la peste bovina: se considera que Asia y el Cercano Oriente están libres del virus y se están haciendo denodados esfuerzos para asegurar que no rebrote en su último posible foco: el ecosistema pastoral somalí, que abarca el nordeste de Kenya y el sur de Somalia. El objetivo de un mundo totalmente libre de la peste bovina está a nuestro alcance. La peste bovina sería la segunda enfermedad erradicada en todo el mundo, después de la viruela.

Los avances realizados hasta ahora han supuesto un notable triunfo de la ciencia veterinaria y constituyen un buen ejemplo de lo que puede lograrse cuando la comunidad internacional y los

distintos países, sus servicios veterinarios y sus agricultores cooperan para elaborar y aplicar políticas basadas en resultados y estrategias para sacarlas adelante. La Campaña panafricana contra la peste bovina supervisada por la Unión Africana, y el Programa mundial de erradicación de la peste bovina (PMEPB), supervisado por la FAO, son los principales medios para coordinar la lucha contra esta enfermedad.

La biotecnología ha ocupado un lugar central en este esfuerzo. En primer lugar, permitió elaborar y producir en gran escala las vacunas utilizadas para proteger a muchos millones de animales mediante campañas nacionales de vacunación masiva. La vacuna inicial, creada en Kenya por el Dr. Walter Plowright y sus colegas con apoyo del Reino Unido, se basaba en un virus atenuado mediante sucesivos pasajes por cultivos de tejidos. El Dr. Plowright fue galardonado en 1999 con el Premio mundial de la alimentación por esa labor. Aunque esa vacuna era muy eficaz e inocua, perdía parte de su potencial al ser expuesta al calor. Por ello se realizaron nuevas investigaciones orientadas a crear una vacuna termoestable que pudiera utilizarse en zonas remotas. Ello se consiguió gracias a las investigaciones realizadas en Etiopía por el Dr. Jeffery Mariner con apoyo de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID).

En segundo lugar, la biotecnología ofreció una plataforma tecnológica

los ganaderos que recurren a la inseminación artificial no deben hacer frente a los costos o los peligros de criar machos reproductores y pueden tener acceso a semen procedente de cualquier lugar del mundo.

A pesar de su uso generalizado en los países desarrollados y en muchos países en desarrollo, inclusive en el marco de los regímenes más avanzados de pequeña propiedad, la inseminación artificial sólo se aplica en las explotaciones que practican la cría intensiva de animales de gran valor.

Evidentemente, esto no se debe a problemas técnicos relacionados con la producción y almacenamiento de semen, ya que la mayoría de los procedimientos están en la actualidad plenamente normalizados y son de eficacia comprobada incluso en las condiciones reinantes en los países en desarrollo tropicales. Se debe más bien a las muchas limitaciones en cuanto a la organización, la logística y la capacitación de los ganaderos, que influyen en la calidad y la eficacia de la tecnología.

(ELISA, sistemas cromatográficos y pruebas moleculares) para detectar e identificar virus y vigilar la eficacia de las campañas de vacunación. Antes de que la FAO y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), con ayuda de la Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo (ASDI), elaborasen estas técnicas y las estrategias de muestreo y ensayo necesarias, no era posible distinguir los animales vacunados de los infectados, por lo que los países no podían demostrar que estaban libres de la peste bovina. Como resultado de ello, tenían que realizar indefinidamente costosos programas anuales de vacunación, al tiempo que seguían sufriendo las consecuencias de las restricciones impuestas a los desplazamientos de los animales y al comercio para evitar la propagación de la enfermedad.

Los efectos económicos de esos esfuerzos son ya visibles. Aunque el costo de la vacunación y de las muestras y análisis de sangre ha sido alto para los países desarrollados y en desarrollo, la eficacia de las campañas nacionales y regionales y de la coordinación mundial queda demostrada por el hecho de que los brotes de la enfermedad que se siguen produciendo en el mundo proceden de un único pequeño foco. En cambio, en 1987 la enfermedad estaba presente en 14 países africanos, así como en el Pakistán y en algunos países del Cercano Oriente.

Aunque los costos y beneficios varían considerablemente de un país a otro, las

cifras correspondientes a África revelan la eficacia de la Campaña panafricana contra la peste bovina y del PMEPEB. Los brotes más importantes de peste bovina suelen durar cinco años y causar una mortalidad total del 30 por ciento de los animales afectados. Dado que la cabaña de bovinos del África subsahariana es de 120 millones de animales, esa cifra representa unos 8 millones de cabezas al año. Si el valor de cada animal se estima en 120 dólares EE.UU., el costo de otro brote importante de peste bovina sería de unos 960 millones de dólares. En el marco de la Campaña, se vacunaron unos 45 millones de cabezas al año con un costo de 36 millones de dólares, al que hay que añadir unos 2 millones de gastos en vigilancia serológica y supervisión. Esto representa un coeficiente de rentabilidad de 22:1 aproximadamente y un beneficio económico neto para la región de 920 millones de dólares al año como mínimo.

La Campaña panafricana contra la peste bovina y el PMEPEB han reportado también otros beneficios importantes. Uno de ellos es que, gracias a las políticas, estrategias y disposiciones institucionales adoptadas para luchar contra la peste bovina, que han permitido establecer estrechas relaciones entre los agricultores, el personal de campo y de laboratorio y las autoridades nacionales, los países han tenido la oportunidad de seguir avanzando y hacer frente al desafío de combatir o erradicar otras enfermedades que afectan al ganado y a la seguridad alimentaria mundial.

La OMTE representa un adelanto con respecto a la inseminación artificial, tanto en lo que concierne a los posibles beneficios genéticos como al grado de capacidad técnica y de organización que se necesitan. La OMTE es una de las tecnologías básicas para la aplicación de biotecnologías reproductivas más avanzadas, como la clonación y la transgénica. En 2001 se realizaron en todo el mundo 450 000 trasplantes de embriones de ganado bovino lechero, de los que el 62 por

ciento correspondió a América del Norte y Europa, seguidas de América del Sur (16 por ciento) y Asia (11 por ciento). Cerca del 80 por ciento de los toros utilizados en la inseminación artificial se habían obtenido mediante la OMTE. La principal ventaja de la OMTE para los países en desarrollo reside en la posibilidad de importar embriones congelados en lugar de animales vivos, por ejemplo para el establecimiento de un núcleo de animales reproductores con recursos genéticos adaptados a las



condiciones locales que entrañan un riesgo sanitario menor.

### Manipulación de juegos de cromosomas y reversión sexual en peces

El control de la capacidad sexual y reproductiva de los peces puede ser importante por razones comerciales y ambientales. A menudo uno de los sexos es objeto de una preferencia mayor que el otro. Por ejemplo, sólo la hembra del esturión produce caviar y el macho de la tilapia crece más deprisa que la hembra. La esterilidad puede ser deseable cuando la reproducción afecta al sabor del producto (como en el caso de las ostras) o cuando las especies cultivadas (sean o no transgénicas) pueden cruzarse con poblaciones que viven en libertad. La manipulación de juegos de cromosomas y la reversión sexual son técnicas bien consolidadas para controlar estos factores. En la manipulación de juegos de cromosomas, se pueden aplicar choques térmicos, químicos y de presión a huevos de peces para obtener individuos con tres juegos de cromosomas en lugar de los dos habituales. Estos organismos triploides no suelen canalizar la energía hacia la reproducción, por lo que son funcionalmente estériles. La reversión sexual puede efectuarse por diversos métodos, incluido el consistente en administrar las hormonas apropiadas. Por ejemplo, las tilapias genéticamente machos pueden convertirse en hembras mediante tratamientos con estrógenos. Cuando estos machos genéticos se aparean con machos normales producen un grupo de tilapias machos en su totalidad.

### Ingeniería genética en ganado y peces

Se puede utilizar la ingeniería genética en animales bien para introducir genes exógenos en el genoma animal, bien para «vaciar» los genes seleccionados. El método más utilizado en la actualidad es la microinyección directa de ADN en los protonúcleos de huevos fertilizados, pero se están logrando avances en nuevos métodos como el trasplante nuclear y la utilización de lentivirus como vectores de ADN. En los primeros experimentos de ingeniería genética con animales de granja, se introdujeron en cerdos genes

responsables del crecimiento para aumentar éste y mejorar la calidad de la canal. Las investigaciones actuales se centran, entre otras cosas, en la resistencia a enfermedades de los animales como la parálisis aviar, la tembladera de los ovinos y la mastitis de las vacas, y a enfermedades que afectan a la salud humana como la salmonelosis en las aves de corral. Otros aspectos investigados son el aumento del contenido de caseína de la leche y la inducción de la producción de sustancias farmacéuticas o industriales en la leche o el semen de animales. Aunque son sencillos en su concepción, los métodos utilizados para modificar genéticamente el ganado requieren un equipo especial y una considerable destreza, y las aplicaciones agrícolas no han dado hasta ahora resultados comerciales satisfactorios. Por consiguiente, es probable que estas aplicaciones se limiten en un futuro próximo a la creación de animales transgénicos destinados a la obtención de productos industriales o farmacéuticos.

En el sector de la acuicultura se están llevando a cabo intensas actividades de investigación y desarrollo relacionadas con la ingeniería genética. Las grandes dimensiones de muchos huevos de peces y su dureza permiten manipularlos con bastante comodidad y facilitan la transferencia de genes por inyección directa de un gen exógeno o mediante electroporación, en la que se transfieren genes con ayuda de un campo eléctrico. Los genes transferidos en los peces suelen ser los que producen la hormona del crecimiento, habiéndose observado que esa transferencia aumenta espectacularmente las tasas de crecimiento en las carpas, los salmones, las tilapias y otras especies. Además, se introdujo en el salmón un gen procedente de la solla roja que produce una proteína anticongelante, con la esperanza de ampliar la zona de distribución de ese pez. El gen no produjo la proteína suficiente para ampliar la zona de distribución del salmón a aguas más frías, pero sí permitió que el salmón siguiera creciendo durante los meses fríos en que el salmón no transgénico no crece. Estas aplicaciones se encuentran todavía en fase de investigación y desarrollo, y actualmente no hay animales acuáticos transgénicos a disposición de los consumidores.

## Otras biotecnologías

### Diagnóstico y epidemiología

Las enfermedades de las plantas y los animales son difíciles de diagnosticar porque los síntomas pueden inducir a error o estar incluso totalmente ausentes hasta que se producen daños importantes. Pruebas de diagnóstico basadas en biotecnologías avanzadas permiten identificar a los agentes causantes de la enfermedad y vigilar los efectos de los programas para combatirla con un grado de precisión antes inconcebible. La epidemiología molecular caracteriza los patógenos (virus, bacterias, parásitos y hongos) mediante una secuenciación de los nucleótidos que permite rastrear su origen. Esto es especialmente importante en el caso de las enfermedades epidémicas, en las que la posibilidad de localizar la fuente de infección puede contribuir de manera significativa a mejorar la lucha contra ellas. Por ejemplo, el análisis molecular de los virus de la peste bovina ha sido fundamental para determinar los linajes que circulan por el mundo y ha sido de ayuda en el Programa mundial de erradicación de la peste bovina (Recuadro 11, pág. 22). Los ensayos de inmunoabsorción enzimática (ELISA) son actualmente el método habitual de diagnóstico y vigilancia de muchas enfermedades del ganado y de los peces en el mundo, mientras que la técnica de la reacción en cadena de la polimerasa es especialmente útil para diagnosticar enfermedades de las plantas y lo está resultando cada vez más para diagnosticar enfermedades del ganado y los peces. El perfeccionamiento de sondas genéticas que permiten distinguir y detectar determinados patógenos en tejidos, animales enteros e incluso muestras de agua y suelo está aumentando también considerablemente la eficacia de los programas de sanidad vegetal y animal.

### Elaboración de vacunas

Gracias a la ingeniería genética se están elaborando vacunas para proteger a los peces y al ganado contra patógenos y parásitos. Aunque las vacunas elaboradas por métodos tradicionales han tenido

una gran repercusión en la lucha contra la fiebre aftosa y las enfermedades transmitidas por garrapatas, la peste bovina y otras enfermedades del ganado, las vacunas recombinantes ofrecen diversas ventajas respecto de las convencionales en cuanto a seguridad, especificidad y estabilidad. Hay que destacar que esas vacunas, acompañadas de las pruebas de diagnóstico adecuadas, permiten distinguir entre animales vacunados e infectados por causas naturales. Esto es importante en los programas de lucha contra enfermedades, porque permite realizar una vacunación continua aun en el momento de pasar de la fase de lucha a la de erradicación. En la actualidad existen por ejemplo vacunas mejoradas para la enfermedad de Newcastle, la fiebre porcina clásica y la peste bovina. Además de las mejoras técnicas, los avances en la biotecnología permitirán producir vacunas más baratas y mejorar por lo tanto su suministro y la disponibilidad para los pequeños productores.

### Nutrición animal

Las biotecnologías han producido ya medios auxiliares para la nutrición animal, como enzimas, probióticos, proteínas unicelulares y aditivos antibióticos para piensos que se utilizan ampliamente en sistemas de producción intensiva de todo el mundo para mejorar la disponibilidad de nutrientes en los piensos y aumentar la productividad de la ganadería y la acuicultura. Las tecnologías genéticas son cada vez más utilizadas para mejorar la nutrición animal, modificando o bien los piensos para hacerlos más digeribles o bien los sistemas digestivo y metabólico de los animales para que puedan aprovechar mejor los piensos disponibles. Aunque es probable que este último método avance lentamente, debido a las lagunas existentes en el conocimiento actual de la genética, la fisiología y la bioquímica en que se sustenta, la utilización de somatotropina recombinante, hormona que da lugar a un aumento de la producción de leche en las vacas lecheras y a un crecimiento acelerado y canales más magras en los animales para carne, es un ejemplo de éxito comercial en sistemas con alto coeficiente de insumos y explotación intensiva.

## Conclusiones

La biotecnología es un complemento, y no un sustituto, en muchas esferas de la investigación agrícola convencional. Ofrece una variedad de instrumentos para mejorar nuestra comprensión y ordenación de los recursos genéticos para la agricultura y la alimentación. Esos instrumentos están contribuyendo ya a los programas de mejoramiento y conservación y facilitando el diagnóstico, tratamiento y prevención de enfermedades de las plantas y los animales. La aplicación de la biotecnología proporciona al investigador nuevos conocimientos e instrumentos que aumentan la eficacia de su trabajo. De este modo, los programas de investigación basados en la biotecnología pueden ser considerados como una prolongación más precisa de los métodos convencionales (Dreher *et al.*, 2000). Al mismo tiempo, la ingeniería genética puede ser considerada como una desviación radical de las técnicas convencionales de mejoramiento porque confiere a los científicos la capacidad de transferir material genético entre organismos que no podrían obtenerse por los medios clásicos.

La biotecnología agrícola es intersectorial e interdisciplinaria. La mayoría de las técnicas moleculares y sus aplicaciones son comunes a todos los sectores de la agricultura y la alimentación, pero la biotecnología no puede valerse por sí misma. Por ejemplo, la ingeniería genética aplicada a los cultivos no puede avanzar sin los conocimientos derivados de la genómica y es de poca utilidad práctica si no hay un programa eficaz de fitogenética. Todo objetivo de investigación requiere el dominio de una multitud de elementos tecnológicos. La biotecnología debe formar parte de un programa amplio e integrado de investigación agrícola que aproveche la labor realizada en otros programas sectoriales, disciplinarios y nacionales. Esto tiene amplias consecuencias para los países en desarrollo y sus asociados en el desarrollo a la hora de elaborar y aplicar políticas, instituciones y programas nacionales de creación de capacidad en relación con la investigación (véase el Capítulo 8).

La biotecnología agrícola es internacional. Aunque en su mayor parte se están

realizando en países desarrollados (véase el Capítulo 3), las investigaciones básicas sobre biología molecular pueden ser beneficiosas para los países en desarrollo en la medida en que permiten conocer mejor la fisiología de todos los vegetales y animales. Los descubrimientos de los proyectos sobre el genoma humano y el genoma del ratón benefician directamente a los animales de granja, y viceversa, mientras que los estudios sobre el maíz y el arroz presentan paralelismos que pueden aplicarse a cultivos de subsistencia como el sorgo y el tef. Sin embargo, es necesaria una labor específica sobre las razas y especies de importancia para los países en desarrollo. Es en éstos donde se encuentra la mayor biodiversidad agrícola mundial, pero se ha hecho poco por caracterizar esas especies vegetales y animales a nivel molecular con el fin de evaluar su potencial de producción y su capacidad para resistir a las enfermedades y a las condiciones ambientales desfavorables o de garantizar su conservación a largo plazo.

Es probable que la aplicación de las nuevas biotecnologías moleculares y de las nuevas estrategias de mejoramiento a cultivos y razas de especial interés para los pequeños productores de los países en desarrollo sea limitada en un futuro próximo por diversas razones (véanse los Capítulos 3 y 7), tales como la falta de fondos seguros a más largo plazo para la investigación, la insuficiencia de la capacidad técnica y operativa, el escaso valor comercial de los cultivos y razas, la ausencia de programas adecuados de mejoramiento convencional y la necesidad de elegir entre los entornos de producción pertinentes. Sin embargo, los países en desarrollo se enfrentan ya con la necesidad de evaluar cultivos modificados genéticamente (véanse los Capítulos 4 a 6) y en su momento tendrán también que evaluar la posible utilización de árboles, ganado y peces modificados genéticamente. Esas innovaciones podrían ofrecer una oportunidad para aumentar la producción, la productividad, la calidad de los productos y la aptitud para la adaptación, pero sin duda plantearán desafíos a la capacidad de investigación y reglamentación de los países en desarrollo.

### 3. De la Revolución Verde a la Revolución Genética

La Revolución Verde puso al alcance de millones de pequeños agricultores, inicialmente en Asia y América Latina, pero más tarde también en África, variedades semienanas de trigo y arroz de alto rendimiento, obtenidas con métodos convencionales de mejoramiento. Los aumentos conseguidos durante los primeros decenios de la Revolución Verde se extendieron en los decenios de 1980 y 1990 a otros cultivos y a regiones menos favorecidas (Evenson y Gollin, 2003). A diferencia de las investigaciones que impulsaron la Revolución Verde, la mayoría de las investigaciones sobre biotecnología agrícola y casi todas las actividades de comercialización están siendo realizadas por empresas privadas que tienen su sede en países industrializados.

Esto representa un giro radical con respecto a la Revolución Verde, en la que el sector público desempeñó un importante papel en la investigación y la difusión de las tecnologías. Este cambio de paradigma tiene importantes consecuencias para la índole de la investigación que se realiza, los tipos de tecnologías que se elaboran y el modo en que se divulgan esas tecnologías. El predominio del sector privado en la biotecnología agrícola hace temer que los agricultores de los países en desarrollo, especialmente los agricultores pobres, puedan no sacar provecho de ella, ya sea porque no se pongan a su disposición las innovaciones apropiadas o porque éstas sean demasiado costosas.

La investigación del sector público impulsó la creación de las variedades de trigo y arroz de alto rendimiento que pusieron en marcha la Revolución Verde. Investigadores de entidades públicas nacionales e internacionales insertaron genes del enanismo en cultivares seleccionados de trigo y arroz para que produjeran más grano y tuvieran tallos más cortos que les permitieran responder a mayores niveles de fertilizantes y agua. Estos cultivares semienanos se pusieron libremente a disposición de los

fitogenetistas de países en desarrollo que los adaptaron a las condiciones locales de producción. En algunos países hubo empresas privadas que participaron en la elaboración y comercialización de variedades adaptadas a las condiciones locales, pero el germoplasma mejorado fue facilitado por el sector público y difundido libremente como bien público (Pingali y Raney, 2003).

Los países que pudieron aprovechar en mayor medida las oportunidades que ofrecía la Revolución Verde fueron los que tenían ya, o crearon rápidamente, una amplia capacidad nacional de investigación agrícola. Los investigadores de esos países pudieron realizar las adaptaciones locales necesarias para que las variedades mejoradas satisficieran las necesidades de sus agricultores y consumidores. La capacidad nacional de investigación agrícola determinó de manera decisiva la disponibilidad y accesibilidad de las tecnologías agrícolas de la Revolución Verde, y esto sigue siendo aplicable a las nuevas biotecnologías. La capacidad nacional de investigación aumenta las posibilidades que tiene un país de importar y adaptar tecnologías agrícolas elaboradas en otro lugar, crear aplicaciones que satisfagan las necesidades locales (como en el caso de los cultivos que carecen de interés comercial) y regular debidamente las nuevas tecnologías.

La revolución biotecnológica, por el contrario, está siendo impulsada en gran medida por el sector privado. La investigación pública ha contribuido a establecer los principios científicos básicos en que se basa la biotecnología agrícola, pero la mayor parte de las investigaciones aplicadas y casi todo el aprovechamiento comercial han estado a cargo del sector privado. Tres fuerzas relacionadas entre sí están transformando el modo de suministrar a los agricultores de todo el mundo tecnologías agrícolas mejoradas. La primera es el reforzamiento del marco para proteger la propiedad intelectual de las innovaciones

### APORTACIÓN ESPECIAL 1

#### Alimentar a 10 000 millones de personas: el desafío con que nos enfrentamos en el siglo XXI

*Norman E. Borlaug<sup>1</sup>*

En los últimos 35 años, la producción de cereales se ha duplicado con creces, a un ritmo más veloz que el crecimiento demográfico mundial. La adopción rápida de variedades modernas, la triplicación del consumo de fertilizantes químicos y la duplicación de la superficie regada han sido factores fundamentales que han determinado esta Revolución Verde. Incrementando los rendimientos en las tierras más idóneas para la agricultura, los agricultores del mundo han podido dejar intactas vastas superficies de tierras para destinarlas a otros fines.

La población mundial puede alcanzar los 10 000 millones de habitantes para mediados de este siglo. Durante los próximos 20 años, la demanda mundial de cereales aumentará en un 50 por ciento, por efecto de la utilización rápidamente creciente de piensos y el consumo de carne. Con excepción de las zonas de

suelos ácidos de África y América del Sur, el potencial para ampliar las superficies mundiales de cultivo es limitado. Los aumentos futuros de producción de alimentos deben proceder en gran parte de las tierras ya en uso. Es necesario, por tanto, sostener y mejorar la productividad de esas tierras.

La mayoría de los 842 millones de personas hambrientas del mundo viven en tierras marginales y dependen de la agricultura para su subsistencia. Los hogares expuestos a inseguridad alimentaria en estas zonas rurales de más elevado riesgo se enfrentan con frecuentes situaciones de sequías, tierras degradadas, larga distancia de los mercados e instituciones de mercado deficientes. Para muchas de estas personas, la seguridad alimentaria procederá únicamente del aumento de la producción y los ingresos. Es necesario invertir en la ciencia, la infraestructura y la conservación de los recursos para aumentar la productividad y reducir los riesgos en las tierras marginales. Algunos de los problemas que se plantean en estos ambientes serán demasiado grandes para superarlos. No obstante, es posible lograr mejoras considerables. La biotecnología

<sup>1</sup> Norman Borlaug es Presidente de la Sasakawa Africa Association, Profesor Emérito de Agricultura Internacional, de la Texas A&M University, y ganador del Premio Nóbel de la Paz de 1970. Es conocido como el padre de la Revolución Verde por su labor pionera en el mejoramiento del trigo y su producción.

en las plantas. La segunda es el rápido ritmo de los descubrimientos y la creciente importancia de la biología molecular y la ingeniería genética. Por último, la apertura cada vez mayor del comercio de insumos y productos agrícolas en casi todos los países está ampliando el mercado potencial tanto para las tecnologías nuevas como para las más antiguas. Estas circunstancias han creado incentivos nuevos y eficaces para la investigación privada y están alterando la estructura de las actividades de investigación agrícola pública y privada, especialmente en lo que respecta al fitomejoramiento (Pingali y Traxler, 2002).

A medida que crece la importancia del

sector privado transnacional, aumentan también los costos de transacción con que se enfrentan los países en desarrollo para tener acceso a las tecnologías y poder utilizarlas. Las redes públicas internacionales para intercambiar tecnologías entre países y obtener así los máximos beneficios indirectos están cada vez más amenazadas. Se necesita con urgencia un sistema de circulación de tecnologías que preserve los incentivos para la innovación en el sector privado al tiempo que satisfaga las necesidades de los agricultores pobres en el mundo en desarrollo.

En la primera sección de este capítulo se ofrece una reseña de la organización y los

desempeñará una importante función en la elaboración de nuevo germoplasma que permita una mayor tolerancia a las condiciones de estrés abiótico y biótico y con mayor contenido nutricional. Es necesario continuar el mejoramiento genético de los cultivos alimentarios, utilizando instrumentos de investigación convencionales y la biotecnología, para desplazar la línea de rendimiento a un nivel superior y para aumentar la estabilidad del mismo.

El hombre del Neolítico, o mucho más probablemente la mujer, domesticó prácticamente todas las especies alimentarias y ganaderas en un período relativamente breve, hace 10 000-15 000 años. Posteriormente, varios centenares de generaciones de agricultores determinaron enormes modificaciones genéticas en todas las principales especies de cultivos y animales. Gracias al desarrollo de la ciencia durante los últimos 150 años, se dispone ahora de los conocimientos fitogenéticos y de mejoramiento para realizar intencionadamente lo que la naturaleza ha hecho en el pasado por casualidad o por designio. La modificación genética de los cultivos no es ningún tipo de brujería; más bien, consiste

en aprovechar progresivamente las fuerzas de la naturaleza para alimentar a la especie humana. Por supuesto, la ingeniería genética –el fitomejoramiento a nivel molecular–, no es sino otro paso en la profundización del progreso científico de la humanidad en los genomas vivos. No se trata de una sustitución para un mejoramiento convencional, sino de un instrumento de investigación complementario para identificar los caracteres convenientes de grupos taxonómicos de emparentamiento remoto y transferirlos más rápidamente y con mayor precisión a especies de cultivos de alto rendimiento y de alta calidad.

El mundo dispone de la tecnología (ya en uso o bien en fase de investigación avanzada) para alimentar de forma sostenible a una población de 10 000 millones de personas. No obstante, el acceso a tal tecnología no está asegurado. La gama de posibles obstáculos incluye cuestiones relacionadas con los derechos de propiedad intelectual, la aceptación de la tecnología por la sociedad civil y los gobiernos, y los obstáculos financieros y educativos que mantienen a los agricultores pobres marginados e incapaces de adoptar la nueva tecnología.

efectos de las corrientes de investigación y tecnología agrícolas en el período 1960-90, cuando prevalecía el paradigma de la investigación internacional del sector público característico de la Revolución Verde. En la segunda sección se examina la reorientación hacia un aumento de la privatización de la investigación y desarrollo agrícolas, y sus consecuencias para el acceso de los países en desarrollo a las tecnologías, como lo revelan las últimas tendencias mundiales en la investigación, el desarrollo y la comercialización agrícolas. La sección final plantea diversas preguntas con respecto a la posibilidad de que la Revolución Genética beneficie a los sectores pobres de la

población. Estas preguntas se retoman en los capítulos posteriores del informe.

### **La Revolución Verde: investigación, desarrollo, acceso y efectos**

La Revolución Verde dio origen a un extraordinario crecimiento de la productividad de los cultivos alimentarios en el mundo en desarrollo durante los últimos 40 años (Evenson y Gollin, 2003). Una combinación de altas tasas de inversión en investigación, infraestructura y mejora de los mercados agrícolas y una política adecuada de apoyo impulsaron este avance.



## APORTACIÓN ESPECIAL 2 Hacia una revolución siempre verde

M.S. Swaminathan<sup>1</sup>

En agosto de 1968, el Gobierno de la India emitió un sello titulado «Revolución del trigo» para sensibilizar al público acerca de los caminos revolucionarios que la India había tomado en relación con el aumento de la producción de trigo. Si bien destacó los progresos respecto del rendimiento de las cosechas de trigo, el Gobierno había emprendido también un programa masivo para desarrollar y difundir variedades de arroz, maíz, sorgo y mijo perlado de alto rendimiento. Estos programas impulsaron la Revolución Verde en la India, que permitieron lograr avances espectaculares en la producción y la productividad, sin aumentar la superficie de cultivo.

Debido a que estas variedades de alto rendimiento requieren insumos como fertilizantes y agua de riego, los sociólogos criticaron las tecnologías de la Revolución Verde por no ser neutrales respecto de los recursos. Los ambientalistas atacaron la Revolución Verde alegando los posibles daños a la productividad a

largo plazo, como consecuencia del uso excesivo de plaguicidas y fertilizantes y de monocultivo. A pesar del éxito de la Revolución Verde en sacar a millones de personas de la miseria, la incidencia de la pobreza, el hambre endémica, las enfermedades contagiosas, las tasas de mortalidad materno-infantil, el reducido peso de los niños al nacer, el retraso del crecimiento y el analfabetismo siguieron siendo elevados.

Las preocupaciones de los sociólogos y los ecologistas así como los restantes problemas urgentes de pobreza y hambre me condujeron a desarrollar el concepto de «revolución siempre verde» para subrayar la necesidad de mejorar la productividad de los cultivos con carácter permanente, sin los daños ecológicos o sociales concomitantes. La revolución siempre verde puede lograrse sólo si prestamos atención a las vías que pueden contribuir a lograr progresos revolucionarios en mejorar la productividad, la calidad y el valor añadido en condiciones de disminución per cápita de tierras cultivables y agua de riego disponible, ampliando las condiciones de estrés biótico y abiótico, y cambiando rápidamente las preferencias de los consumidores y del mercado. Ello requerirá movilizar los mejores recursos tanto de conocimientos y tecnologías

<sup>1</sup> M.S. Swaminathan es el Presidente de la M.S. Swaminathan Research Foundation. Ha trabajado durante los últimos 50 años con científicos y formuladores de políticas en una variedad de problemas relativos a la fitogenética básica y aplicada, así como a la investigación del desarrollo agrícola. Es muy conocido como el padre de la Revolución Verde de la India.

Estos elementos estratégicos de la Revolución Verde mejoraron la productividad a pesar de la creciente escasez y el alto valor de las tierras (Pingali y Heisey, 2001).

### Investigación pública y transferencia internacional de tecnologías

La Revolución Verde puso en entredicho el dogma de que la tecnología agrícola no se puede exportar porque es específica de unas condiciones agroclimáticas, como en el caso de la tecnología biológica, o sensible a los precios relativos de los factores, como en el caso de la tecnología

mecánica (Byerlee y Traxler, 2002). La estrategia de la Revolución Verde para promover el crecimiento de la productividad de los cultivos alimentarios se basó explícitamente en la premisa de que, con unos mecanismos institucionales apropiados, se podría conseguir que los beneficios indirectos de la tecnología superasen las fronteras políticas y agroclimáticas. Por esa razón se creó el Grupo Consultivo sobre Investigación Agrícola Internacional (GCAI), expresamente encargado de generar beneficios tecnológicos indirectos, especialmente para los países que no estaban

tradicionales como de la ciencia de frontera. Entre las tecnologías de frontera idóneas para la fase siguiente de la revolución agrícola, la más avanzada es la biotecnología.

Los temores relativos a la genética molecular y la ingeniería genética se encuadran en las siguientes categorías amplias: la ciencia propiamente dicha, el control de la ciencia, el acceso a la ciencia, preocupaciones ambientales, y la salud humana y de los animales. Será importante afrontar el estudio de estas cuestiones separadamente para un análisis riguroso de los riesgos y beneficios. Si dichas cuestiones se afrontan en forma global para todas las aplicaciones de ingeniería genética, ello dará lugar a conclusiones generales poco apropiadas, tales como la condena general de los OMG expresada por las organizaciones no gubernamentales (ONG) en la Cumbre Mundial sobre la Alimentación: cinco años después, celebrada en Roma en 2002.

Los beneficios de las técnicas de mejoramiento molecular, tales como el uso de marcadores moleculares y el mejoramiento de precisión para caracteres específicos mediante tecnologías de ADN recombinante son inmensos. La labor ya realizada en la India ha revelado el potencial de mejoramiento de nuevas variedades de OMG que

poseen la tolerancia a la salinidad y a la sequía, a algunas importantes plagas y enfermedades, junto con una calidad nutritiva mejorada. Se ha entrado en una nueva era de mejoramiento mendeliano y molecular. La revolución siempre verde mezclará estas tecnologías de frontera con la prudencia ecológica de las comunidades tradicionales para crear tecnologías que se basan en la ordenación integrada de recursos naturales y que se aplican en modo específico según el lugar, debido a que se desarrollan mediante la experimentación participativa con las familias de agricultores.

Esta es la única manera en que podemos afrontar los desafíos del futuro, particularmente en el contexto de la escasez de agua de riego y la urgente necesidad de mejorar la productividad en las zonas agrícolas semiáridas y áridas. El progreso agrícola acelerado es la mejor red de seguridad contra el hambre y la pobreza, porque en la mayoría de los países en desarrollo más del 70 por ciento de la población depende de la agricultura para sus medios de vida. Negándonos a nosotros mismos la fuerza de la nueva genética negaremos un gran servicio tanto a las familias de agricultores que carecen de recursos como a la construcción de un sistema alimentario y nutricional nacional sostenible.

en condiciones de obtener pleno provecho de sus inversiones en investigación. ¿Qué sucede con los beneficios indirectos de la investigación y desarrollo agrícolas en unas condiciones de creciente integración mundial de los sistemas de suministro de alimentos?

Los avances más importantes en el rendimiento potencial que impulsaron la Revolución Verde a finales del decenio de 1960 procedieron de métodos fitogenéticos tradicionales que inicialmente se centraron en el aumento del rendimiento potencial de los principales cultivos cerealeros. Este rendimiento ha seguido aumentando

a un ritmo constante después de los espectaculares progresos iniciales logrados en el decenio de 1960 para el arroz y el trigo. Por ejemplo, el rendimiento potencial del trigo de regadío ha aumentado a un ritmo del 1 por ciento anual durante los tres últimos decenios, lo que representa unos 100 kg por hectárea y año (Pingali y Rajaram, 1999). Durante los primeros decenios de la Revolución Verde prácticamente no se realizaron investigaciones ni se dispuso de germoplasma seleccionado para muchos de los productos cultivados por los agricultores pobres en las zonas agroecológicas menos

favorecidas (como el sorgo, el mijo, la cebada, la yuca y las legumbres), pero a partir del decenio de 1980 se obtuvieron variedades modernas de esos cultivos y se aumentó su rendimiento potencial (Evenson y Gollin, 2003). Además de sus esfuerzos para aumentar el rendimiento de los cultivos de cereales, los fitogenetistas siguieron cosechando éxitos en las esferas menos llamativas pero igualmente importantes de la investigación aplicada. Entre ellos figuran la obtención de plantas con resistencia duradera a una gran variedad de insectos y enfermedades, plantas con mayor tolerancia a diversas condiciones físicas desfavorables, plantas que requieren un número mucho menor de días de cultivo y cereales con mejor sabor y calidad nutricional.

Antes de 1960, no había ningún sistema oficial que ofreciera a los fitogenetistas acceso al germoplasma disponible fuera de sus fronteras. Desde entonces, el sector público internacional (es decir, el sistema del GCIAI) ha sido la fuente principal de suministro de germoplasma mejorado obtenido a partir de métodos convencionales, especialmente para cultivos autógamos como el arroz y el trigo y para el maíz de polinización libre. Estas redes administradas por el GCIAI evolucionaron en los decenios de 1970 y 1980, cuando se ampliaron los recursos financieros para la investigación agrícola pública y las leyes de propiedad intelectual sobre las plantas eran escasas o inexistentes. El intercambio de germoplasma entre fitogenetistas se basa en un sistema no estructurado que por lo general es libre y gratuito. Los obtentores pueden aportar su material a los viveros y sentirse orgullosos de que se adopten en cualquier lugar del mundo, y al mismo tiempo tienen plena libertad de tomar material procedente de ensayos para uso propio.

La circulación internacional de germoplasma ha tenido una importante repercusión en la velocidad y el costo de los programas de obtención de cultivos de los sistemas nacionales de investigaciones agronómicas (SNIA), lo que ha aumentado enormemente su eficacia (Evenson y Gollin, 2003). Traxler y Pingali (1999) han afirmado que la existencia de un sistema de intercambio de germoplasma libre y sin trabas, capaz de atraer los mejores

materiales internacionales, permite a los países tomar decisiones estratégicas sobre las cantidades que deben invertir en capacidad fitogenética. Incluso los SNIA con programas avanzados de investigación agrícola, como los del Brasil, China y la India, acuden con frecuencia a los cultivares de esos viveros para obtener material de preselección y variedades acabadas (Evenson y Gollin, 2003). Los pequeños países con un comportamiento racional optan por beneficiarse gratuitamente del sistema internacional en lugar de invertir en una infraestructura fitogenética propia en gran escala (Maredia, Byerlee y Eicher, 2004).

Evenson y Gollin (2003) informan de que, incluso en el decenio de 1990, el GCIAI contenía un gran número de variedades modernas de casi todos los cultivos alimentarios; el 35 por ciento de todas las variedades distribuidas se basaban en cruzamientos del GCIAI y otro 22 por ciento tenía progenitores u otros antepasados obtenidos mediante esos cruzamientos. Evenson y Gollin señalan que las aportaciones de germoplasma de centros internacionales permitieron a los países en desarrollo obtener beneficios indirectos de inversiones en fitomejoramiento realizadas fuera de sus fronteras y conseguir aumentos de productividad que habrían sido más costosos o incluso habrían resultado imposibles para ellos si se hubieran visto obligados a trabajar únicamente con los recursos genéticos que estaban a su disposición al comienzo del período.

### Efectos de la tecnología de mejoramiento de los cultivos alimentarios

Existen datos sustanciales sobre los efectos de la agronomía moderna y de la circulación internacional de variedades modernas de cultivos alimentarios en la producción, la productividad, los ingresos y el bienestar. Evenson y Gollin (2003) ofrecen información detallada sobre la magnitud de la adopción y los efectos de la utilización de variedades modernas de todos los cultivos alimentarios importantes. La adopción de variedades modernas aumentó rápidamente durante los decenios de la Revolución Verde, y aún más deprisa en los decenios posteriores, pasando (como promedio para todos los cultivos) del 9 por ciento en 1970 al 29 por ciento en 1980, al 46 por ciento en 1990 y al

63 por ciento en 1998. Además, en muchas zonas y muchos cultivos, las variedades modernas de la primera generación han sido sustituidas por otras de la segunda y tercera generaciones (Evenson y Gollin, 2003).

Gran parte del aumento de la producción agrícola registrado en los últimos 40 años se ha debido a un incremento del rendimiento por hectárea, y no a una ampliación de la superficie cultivada. Por ejemplo, los datos de que dispone la FAO indican que, en el conjunto de los países en desarrollo, el rendimiento del trigo aumentó un 208 por ciento entre 1960 y 2000, el del arroz un 109 por ciento, el del maíz un 157 por ciento, el de la papa un 78 por ciento y el de la yuca un 36 por ciento (FAO, 2003). Las tendencias de la productividad total de los factores están en consonancia con indicadores parciales de la productividad, como la tasa de crecimiento del rendimiento (Pingali y Heisey, 2001).

Varios economistas han calculado cuidadosamente la rentabilidad de las inversiones en germoplasma moderno de alto rendimiento realizadas en los últimos decenios. Diversos informes recientes han examinado y analizado los datos de centenares de estudios efectuados en los últimos 30 años para calcular la tasa de rentabilidad social de las inversiones en investigación agrícola. En esos estudios se examinaban las inversiones de instituciones públicas nacionales e internacionales de África, Asia, América Latina y de los países de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), así como del sector privado (Alston *et al.*, 2000; Evenson y Gollin, 2003). Aunque en su realización se habían utilizado diferentes métodos, estos estudios mostraban una notable concordancia al señalar una tasa de rentabilidad social de las inversiones públicas en investigación agrícola del 40-50 por ciento aproximadamente. También llegaban a la conclusión de que las investigaciones del sector privado habían generado una tasa similar de rentabilidad social.

El efecto principal de la investigación agrícola en la población pobre que no vive de la agricultura, así como en las personas pobres de las zonas rurales que son compradores netos de alimentos, consiste en un descenso de los precios de éstos. La adopción generalizada de la tecnología moderna basada en el uso de semillas y

fertilizantes se tradujo en un importante desplazamiento de la oferta alimentaria que aumentó la producción y contribuyó a que bajaran los precios reales de los alimentos:

*Los efectos de la investigación agrícola en la mejora del poder adquisitivo de las personas pobres –al aumentar sus ingresos y reducir los precios de los productos alimenticios básicos– son probablemente la causa principal de las mejoras nutricionales relacionadas con dicha investigación. Sólo las personas pobres pasan hambre. Dado que una parte relativamente grande de cualquier aumento de sus ingresos se destina a la alimentación, los efectos de los desplazamientos de la oferta inducidos por la investigación pueden tener importantes repercusiones nutricionales, especialmente si esos desplazamientos son el resultado de unas tecnologías orientadas a los productores más pobres.*

(Alston, Norton y Pardey, 1995)

Estudios realizados por economistas han justificado empíricamente la afirmación de que el crecimiento del sector agrícola repercute en toda la economía. Hayami *et al.* (1978) demostraron que el rápido crecimiento de la producción de arroz en las aldeas había estimulado la demanda y los precios de la tierra, la mano de obra y los bienes y servicios no agrícolas. Hazell y Haggblade (1993); Delgado, Hopkins y Kelly (1998) y Fan, Hazell y Thorat (1998) corroboraron para todo el sector la afirmación de que la agricultura actúa de hecho como motor del crecimiento económico global.

Una vez adoptadas las variedades modernas, el conjunto de tecnologías que más contribuye a reducir los costos de producción es el que comprende, entre otras cosas, la maquinaria, las prácticas de gestión de la tierra (a menudo en combinación con la utilización de herbicidas), la aplicación de fertilizantes, el manejo integrado de plagas y (más recientemente) las prácticas mejoradas de ordenación de los recursos hídricos. Aunque muchas de las tecnologías de la Revolución Verde fueron elaboradas y difundidas globalmente (por ejemplo, nuevas obtenciones vegetales con tasas recomendadas de fertilizantes, plaguicidas y herbicidas, acompañadas de medidas para regular el agua), muchos componentes

de esas tecnologías fueron adoptados de manera fraccionada y a menudo gradualmente (Byerlee y Hesse de Polanco, 1986). La secuencia de la adopción está determinada por la escasez de los factores y las posibles economías de costos. Herdt (1987) realizó una evaluación detallada de la adopción sucesiva de tecnologías para la ordenación de los cultivos de arroz en Filipinas. Traxler y Byerlee (1992) aportaron datos similares sobre la adopción sucesiva de tecnologías para la ordenación de los cultivos de trigo en Sonora, en el noroeste de México.

Aunque los entornos favorables y de alto potencial fueron los que más se beneficiaron de la Revolución Verde en cuanto a crecimiento de la productividad, los menos favorecidos también sacaron provecho de ella gracias a los beneficios indirectos de la tecnología y la migración de mano de obra a entornos más productivos. Según David y Otsuka (1994), la igualación de salarios entre entornos favorables y desfavorables fue uno de los medios fundamentales de redistribución de las mejoras derivadas del cambio tecnológico. Renkow (1993) obtuvo resultados similares con respecto al trigo cultivado en entornos de alto y bajo potencial en el Pakistán. Byerlee y Moya (1993), en su evaluación mundial de la adopción de variedades modernas de trigo, observaron que, con el tiempo, la adopción de esas variedades en condiciones desfavorables se situó al nivel alcanzado en condiciones más favorables, especialmente cuando el germoplasma creado para entornos de alto potencial se adaptó a otros más marginales. En el caso del trigo, la tasa de crecimiento del rendimiento potencial en zonas propensas a la sequía fue del 2,5 por ciento al año aproximadamente en los decenios de 1980 y 1990 (Lantican y Pingali, 2003). Al principio, el crecimiento del rendimiento potencial en entornos marginales provino de los beneficios indirectos de la tecnología, al adaptarse a ellos variedades creadas para entornos de alto potencial. Sin embargo, durante el decenio de 1990 se lograron nuevos aumentos del rendimiento potencial gracias a actividades de mejoramiento expresamente concebidas para entornos marginales.

### La Revolución Genética: cambio de paradigma en la investigación y desarrollo agrícolas

En los decenios de 1960, 1970 y 1980, la inversión del sector privado en investigaciones fitogenéticas fue limitada, especialmente en el mundo en desarrollo, debido a la falta de mecanismos eficaces para proteger los derechos de propiedad sobre los productos mejorados (Recuadro 12). Esta situación cambió en el decenio de 1990 con la aparición de híbridos para cultivos alógamos como el maíz. La viabilidad económica de los híbridos dio origen a una industria de las semillas en el mundo en desarrollo, iniciada por empresas transnacionales de países desarrollados y seguida de la creación de empresas nacionales (Morris, 1998). A pesar del rápido crecimiento de la industria de las semillas en los países en desarrollo, hasta ahora su actividad ha sido limitada y muchos mercados han quedado desatendidos.

Los incentivos para la investigación agrícola privada aumentaron aún más cuando los Estados Unidos y otros países industrializados permitieron patentar genes construidos por medios artificiales y plantas modificadas genéticamente. Esta protección nacional se reforzó gracias al Acuerdo sobre los Aspectos de los Derechos de Propiedad Intelectual relacionados con el Comercio (ADPIC), establecido en 1995 por la Organización Mundial del Comercio (OMC), que obliga a los miembros de ésta a otorgar protección a las invenciones biotecnológicas (ya se trate de productos o procedimientos) mediante patentes y a las obtenciones vegetales mediante patentes o mediante un sistema *sui generis*. Estas formas de protección de la propiedad ofrecieron al sector privado los incentivos necesarios para participar en la investigación sobre biotecnología agrícola (Recuadro 12).

Las grandes empresas agroquímicas transnacionales fueron las primeras en invertir en la obtención de cultivos transgénicos, aunque gran parte de la investigación científica en que se basaron había sido realizada por el sector público y puesta a disposición de las empresas privadas mediante licencias exclusivas. Una de las razones por las que las empresas

## RECUADRO 12

**Bienes públicos y derechos de propiedad intelectual**

Se entiende por bienes públicos los que generan beneficios para la sociedad además de los rendimientos que a título privado pueden obtener las personas que los crean. En ocasiones se trata de beneficios indirectos. Los bienes públicos no tienen competidores ni son exclusivos. El hecho de no tener competidores implica que los bienes están a disposición de todos por igual, es decir que su consumo por una persona no reduce la cantidad disponible para su consumo por otra. El hecho de no ser exclusivos significa que no se puede impedir utilizarlos a quienes no pagan por ellos. Estas características hacen que los innovadores privados no puedan percibir el beneficio social íntegro de su creación a no ser que se encuentre algún medio para impedir su utilización no autorizada. Dado que no querrán invertir en un nivel de investigación socialmente óptimo, las empresas privadas no pueden beneficiarse plenamente de la investigación mediante la que se producen bienes públicos (Ruttan, 2001).

Gran parte de los resultados de la investigación agrícola, incluida la biotecnológica, presenta al menos una de las características de los bienes públicos. Por ejemplo, cualquier científico puede utilizar los conocimientos sobre la estructura del genoma del arroz sin reducir la cantidad de conocimientos que está a disposición de otros científicos, y una vez que esos conocimientos se publican en una revista científica o

en Internet, es difícil evitar que otras personas los utilicen. Una obtención vegetal transgénica, por el contrario, puede tener hasta cierto punto las características de un bien público (por ejemplo, es difícil evitar por completo su utilización no autorizada), pero no es un bien público puro porque las semillas pueden agotarse y porque se puede impedir, al menos en parte, su utilización no autorizada.

Hay dos formas de impedir la utilización no autorizada de obtenciones vegetales, una biológica y otra jurídica. Las semillas híbridas pueden ser reservadas, reproducidas y replantadas, pero a costa de una importante pérdida de rendimiento y calidad, por lo que la hibridación ofrece una protección biológica a las innovaciones de los genetistas. Las tecnologías genéticas de restricción del uso constituyen otra forma de protección biológica de la propiedad intelectual que ha sido propuesta para los cultivos transgénicos. Estas tecnologías producirían semillas estériles o semillas que necesitarían la aplicación de una sustancia química especial para activar la característica innovadora. La oposición de la opinión pública al método de las semillas estériles ha inducido a la empresa privada Monsanto a abandonar su creación. También se puede recurrir a la protección jurídica por medio de patentes, marcas de fábrica o de comercio y contratos para proteger la propiedad intelectual, pero la protección que ofrece este método suele ser parcial.

agroquímicas se interesaron por las actividades de investigación y desarrollo de cultivos transgénicos fue que preveían el declive del mercado de plaguicidas y estaban buscando nuevos productos (Conway, 2000).

Las empresas químicas comenzaron rápidamente a desarrollar sus actividades comerciales en el sector de la fitogenética comprando empresas de semillas ya existentes, primero en países industrializados y seguidamente en

países en desarrollo. Esas fusiones entre empresas nacionales de semillas y empresas multinacionales eran convenientes desde el punto de vista económico porque unas y otras estaban especializadas en aspectos diferentes del proceso de obtención y distribución de variedades de semillas (Pingali y Traxler, 2002). Se trata de un proceso continuo que empieza con la adquisición de conocimientos sobre los genes útiles (genómica) y la obtención de plantas transgénicas y continúa hasta llegar



al proceso más adaptado a las condiciones locales de incorporación de los transgenes a líneas comerciales y distribución de las semillas a los agricultores. Los productos de las actividades iniciales son aplicables a cultivos y entornos agroecológicos de todo el mundo. Por el contrario, los cultivos y variedades modificados genéticamente suelen ser aplicables a nichos agroecológicos específicos. Dicho de otro modo, los beneficios indirectos y las economías de escala disminuyen a medida que se llega al final del proceso continuo más adaptado a las condiciones locales. Análogamente, los costos y la complejidad de la investigación disminuyen conforme se avanza hacia las actividades finales. Así pues, ha surgido una clara división de tareas en la obtención y distribución de los productos obtenidos por medios biotecnológicos, mediante la cual la empresa transnacional se encarga de la investigación inicial sobre biotecnología y la empresa nacional de las variedades de cultivos con características agronómicas comercialmente deseables (Pingali y Traxler, 2002).

No están tan claras las posibilidades que tienen los sistemas públicos de investigación de beneficiarse de la labor desarrollada por las empresas mundiales. Los programas de investigación del sector público se establecen por lo general de manera que se ajusten a las fronteras políticas estatales o nacionales, y hasta ahora la transferencia directa de tecnologías entre países ha sido limitada (Pingali y Traxler, 2002). El estricto respecto de los límites territoriales reduce considerablemente los beneficios indirectos de las innovaciones tecnológicas entre zonas agroclimáticas similares. El sistema de intercambio de germoplasma del GCIAl ha atenuado el problema en el caso de varios cultivos importantes, pero no está claro si funcionará también para los productos obtenidos por medios biotecnológicos y los cultivos transgénicos, teniendo en cuenta los derechos de propiedad a que están sujetas las tecnologías.

### **Inversión en investigaciones sobre biotecnología**

Para comprender la magnitud de la inversión actual del sector privado en investigaciones biotecnológicas agrícolas, no hay más que examinar su presupuesto

anual para investigación y compararlo con la investigación pública centrada en la agricultura de los países en desarrollo (Pray y Naseem, 2003a). El gasto conjunto anual en investigación y desarrollo agrícolas de las diez empresas transnacionales de ciencias biológicas más importantes del mundo se cifra en unos 3 000 millones de dólares EE.UU. A título de comparación, el GCIAl, que es el mayor proveedor internacional de tecnologías agrícolas del sector público, tiene un presupuesto anual inferior a 300 millones de dólares EE.UU. para investigación y desarrollo en el ámbito de la fitogenética. Los mayores programas de investigación agrícola del sector público en el mundo en desarrollo, que son los del Brasil, China y la India, tienen presupuestos anuales inferiores a 500 millones de dólares EE.UU. cada uno (Byerlee y Fischer, 2002).

Un examen del gasto en investigación sobre biotecnología agrícola revela una profunda divergencia entre países desarrollados y en desarrollo (Cuadro 3). Los países desarrollados gastan en investigación pública sobre biotecnología cuatro veces más que los países en desarrollo, aun si en el caso de éstos se incluyen todas las fuentes de financiación, es decir fondos nacionales, donantes y centros del GCIAl. Pocos países en desarrollo o instituciones públicas internacionales disponen de los recursos necesarios para crear una fuente independiente de innovaciones biotecnológicas (Byerlee y Fischer, 2002).

No se dispone de datos globales sobre la investigación en biotecnología del sector privado en los países en desarrollo, pero parece ser que la mayor parte de la investigación está a cargo de empresas transnacionales que realizan ensayos de variedades transgénicas. Las instituciones nacionales de investigación realizan ciertas actividades (por ejemplo, instituciones nacionales privadas que se ocupan de la caña de azúcar ejecutan programas de investigación sobre biotecnología bastante amplios en el Brasil y Sudáfrica), mientras que en la India varias empresas nacionales de semillas (en particular, la Empresa de Semillas Híbridas Maharashtra [Mahyco]), llevan a cabo programas de investigación sobre biotecnología. No se conoce la suma total invertida en estas actividades privadas, pero indudablemente es inferior a la que

**CUADRO 3**  
**Gasto estimado en investigación sobre biotecnología agrícola**

	(Millones de \$EE.UU. al año)	(Porcentaje)
	Investigación y desarrollo en materia de biotecnología	Proporción de la biotecnología en la investigación y desarrollo
<b>PAÍSES INDUSTRIALIZADOS</b>	<b>1 900-2 500</b>	
Sector privado <sup>1</sup>	1 000-1 500	40
Sector público	900-1 000	16
<b>PAÍSES EN DESARROLLO</b>	<b>165-250</b>	
Sector público (recursos propios)	100-150	5-10
Sector público (ayuda exterior)	40-50	...
Centros del GICAI	25-50	8
Sector privado	...	...
<b>TOTAL MUNDIAL</b>	<b>2 065-2 730</b>	

<sup>1</sup> Incluye una cantidad indeterminada para investigación y desarrollo de países en desarrollo.  
Fuente: Byerlee y Fischer, 2002.

está invirtiendo el sector público de los países en desarrollo en investigación sobre biotecnología (Pray y Naseem, 2003a).

### La investigación sobre cultivos transgénicos medida por los ensayos de campo

Aunque el gasto total en investigación sobre biotecnología se divide bastante equitativamente entre los sectores público y privado, la producción de nuevas tecnologías está casi íntegramente en manos del sector privado<sup>1</sup>. Todos los cultivos modificados genéticamente que se han comercializado hasta ahora en el mundo, a excepción de los obtenidos en China, han sido creados por el sector privado (véase el Capítulo 4). El predominio del sector privado en la obtención de variedades modificadas genéticamente parece indicar que los cultivos y los factores que limitan la producción especialmente importantes para las personas pobres son dejados de lado porque es probable que los mercados para esas semillas sean muy pequeños.

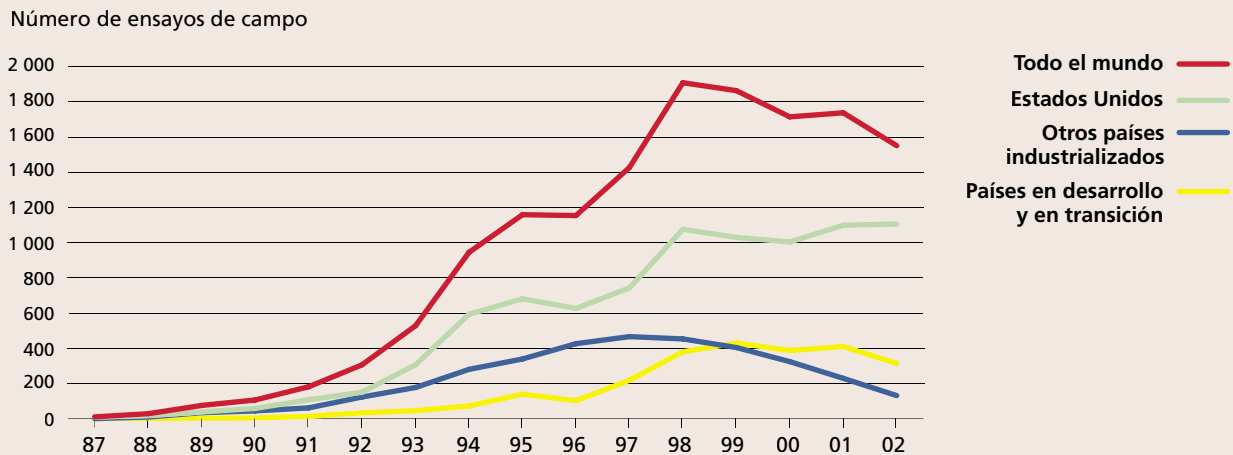
Desde 1987, año en que se aprobaron los primeros ensayos, se han realizado más de 11 000 ensayos de campo con más de 81 cultivos transgénicos diferentes (Figura 1 y Cuadro 4), pero sólo el 15 por ciento de ellos han tenido lugar en países en desarrollo o en transición<sup>2</sup>. Esto se debe a la supuesta falta de potencial comercial de esos mercados y a las dificultades de sus gobiernos para establecer un sistema de reglamentación en materia de bioseguridad. El número de ensayos realizados en los países desarrollados y en transición ha aumentado en los últimos años, y para 2000 al menos 58 países habían notificado ensayos de campo con cultivos transgénicos (Pray, Courtmanche y Govindasamy, 2002). Algunos países han interrumpido los ensayos de campo durante cierto tiempo para reevaluar su sistema de bioseguridad.

Los datos relativos a los ensayos de campo (Cuadro 4 y Figuras 2 y 3) justifican el temor a que cultivos y características importantes para los países en desarrollo puedan ser

<sup>1</sup> No se dispone de datos detallados sobre ensayos de campo para todas las biotecnologías agrícolas. Esta sección se refiere únicamente a los ensayos con cultivos transgénicos.

<sup>2</sup> Esta fuente cuenta cada prueba realizada en una parcela como un ensayo independiente, por lo que un mismo organismo modificado genéticamente puede haber sido objeto de múltiples ensayos en un determinado país.

**FIGURA 1**  
**Ensayos de campo con cultivos transgénicos, por grupos de países**



Fuente: Pray, Courtmanche y Govindasamy, 2002.

dejados de lado. Los cultivos de los que se obtienen alimentos básicos han sido objeto de pocas investigaciones aplicadas en materia de biotecnología, aunque en los últimos años han aumentado los ensayos de campo para el trigo y el arroz, que son los cultivos alimentarios más importantes en los países en desarrollo, y en 2000 se realizaron por vez primera ensayos con una variedad de yuca transgénica. También se han aprobado ensayos de campo para otros cultivos alimentarios básicos, como el banano, la batata, las lentejas y los altramuces, en uno o más países.

Casi dos tercios de los ensayos de campo que se realizan en los países industrializados y tres cuartos de los que se realizan en los países en desarrollo se centran en dos características, la tolerancia a herbicidas y la resistencia a insectos, o en una combinación de ambas (Figuras 2 y 3). Aunque la resistencia a insectos es una característica importante para los países en desarrollo, la resistencia a herbicidas puede que tenga menos interés en las zonas donde abunda la mano de obra agrícola. Por el contrario, características agronómicas de especial importancia para los países en desarrollo y las zonas de producción marginal, como el rendimiento potencial y la tolerancia a condiciones abióticas desfavorables (por ejemplo, la sequía y la salinidad) son objeto de muy pocos ensayos de campo en los países

industrializados y aún menos en los países en desarrollo.

### Comercialización de cultivos transgénicos

En 2003 se producían cultivos transgénicos con fines comerciales en un total de 67,7 millones de hectáreas en 18 países, lo que representa un aumento con respecto a los 2,8 millones de hectáreas cultivadas en 1996 (Figura 4). Esta tasa de difusión global de la biotecnología resulta impresionante, pero su distribución ha sido muy desigual. Seis países, cuatro cultivos y dos características representan el 99 por ciento de la producción mundial de cultivos transgénicos (Figuras 5-7) (James, 2003).

Casi dos tercios de los cultivos transgénicos que se producen en el mundo se encuentran en los Estados Unidos. Aunque la superficie plantada de cultivos transgénicos en este país sigue creciendo, su proporción de la superficie mundial ha disminuido rápidamente, al haber incrementado Argentina, Brasil, Canadá, China y Sudáfrica sus plantaciones. Los otros 12 países donde se producían cultivos transgénicos en 2003 representaban conjuntamente menos del 1 por ciento del total mundial.

Los cultivos transgénicos más difundidos son la soja, el maíz, el algodón y la nabina. Las características más comunes son la tolerancia a herbicidas y la resistencia a

**CUADRO 4**  
**Ensayos de campo, por cultivos y regiones**

	Maíz	Nabina	Papa	Soja	Algodón	Tomate	Remo- lacha	Tabaco	Trigo	Arroz	Otros cultivos	Total
<b>NÚMERO TOTAL DE ENSAYOS</b>	<b>3 881</b>	<b>1 242</b>	<b>1 088</b>	<b>782</b>	<b>723</b>	<b>654</b>	<b>394</b>	<b>308</b>	<b>232</b>	<b>189</b>	<b>1 610</b>	<b>11 105</b>
Estados Unidos y Canadá	2 749	826	770	552	407	494	118	194	190	102	1 087	7 489
Europa/ Nueva Zelandia/ Australia/Japón	452	366	227	20	72	89	237	61	23	36	316	1 901
Economías en transición	61	17	27	7	2	2	33	6	1	0	9	1 550
Países en desarrollo	619	33	64	203	242	69	6	47	18	51	198	1 550
<b>PORCENTAJE DE TODOS LOS CULTIVOS</b>	<b>35</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>14</b>	<b>100</b>
Estados Unidos y Canadá	37	11	10	7	5	7	2	3	3	1	15	100
Europa/ Nueva Zelandia/ Australia/Japón	24	19	12	1	4	5	13	3	1	2	17	100
Economías en transición	37	10	16	4	1	1	20	4	1	0	6	100
Países en desarrollo	40	2	4	13	16	5	0	3	1	3	13	100

Fuente: Pray, Courtmanche y Govindasamy, 2002.

**FIGURA 2**  
**Características de los cultivos modificados genéticamente sometidas a ensayos en los países industrializados, 1987-2000 (porcentaje)**

Tolerancia a herbicidas **29**

Otras características **6**

Resistencia a hongos o bacterias **5**

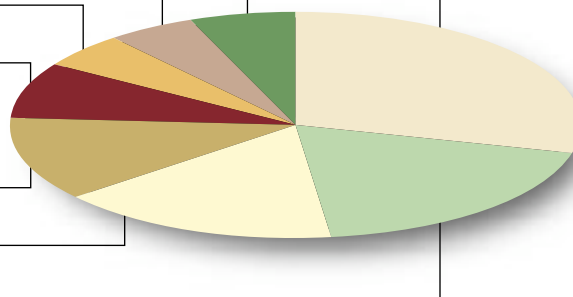
Propiedades agronómicas **5**

Resistencia a virus **8**

Genes combinados **12**

Calidad del producto **16**

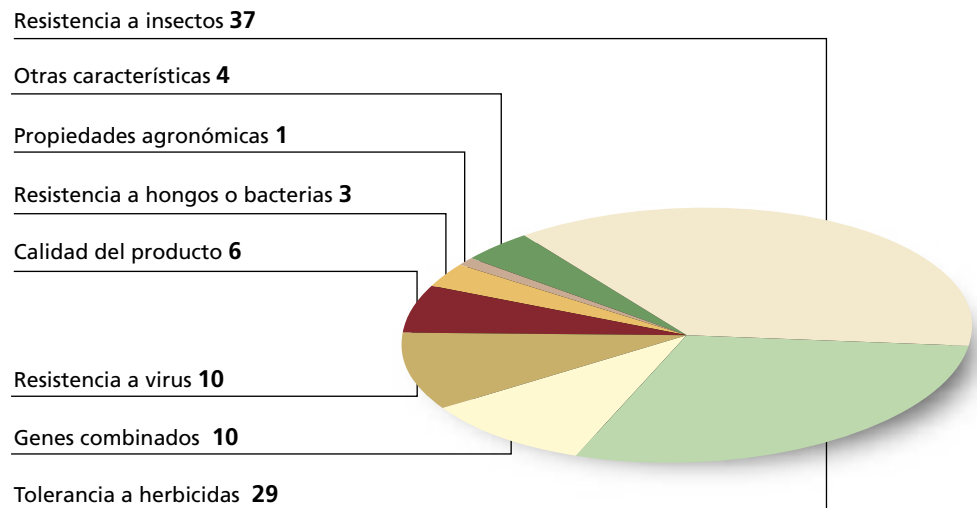
Resistencia a insectos **19**



Fuente: Pray, Courtmanche y Govindasamy, 2002.

FIGURA 3

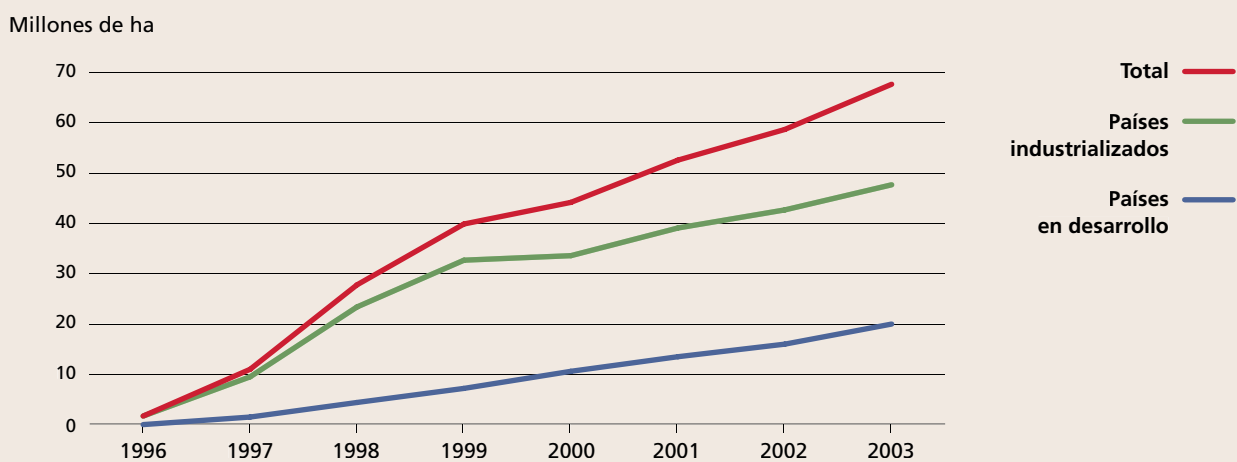
Características de los cultivos modificados genéticamente sometidas a ensayos en los países menos adelantados, 1987-2000 (porcentaje)



Fuente: Pray, Courtmanche y Govindasamy, 2002.

FIGURA 4

Superficie mundial plantada de cultivos transgénicos

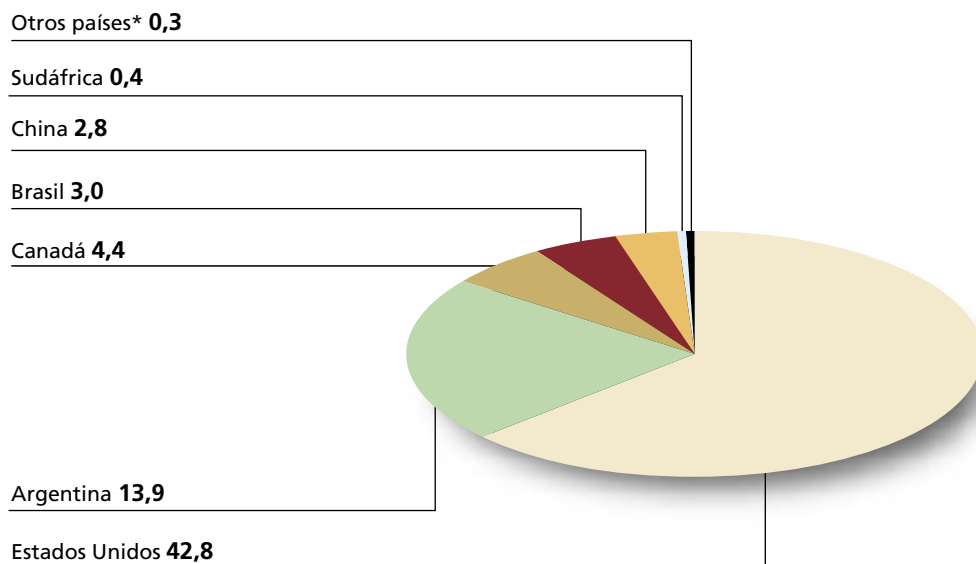


Fuente: James, 2003.

insectos. La soja y la nabina tolerantes a herbicidas ocupan actualmente el 55 por ciento y el 16 por ciento, respectivamente, de la superficie mundial plantada de esos productos. Las variedades transgénicas de

algodón y maíz actualmente cultivadas con fines comerciales incluyen características de resistencia a insectos y tolerancia a herbicidas, o una combinación de ambas, y representan el 21 y el 11 por ciento,

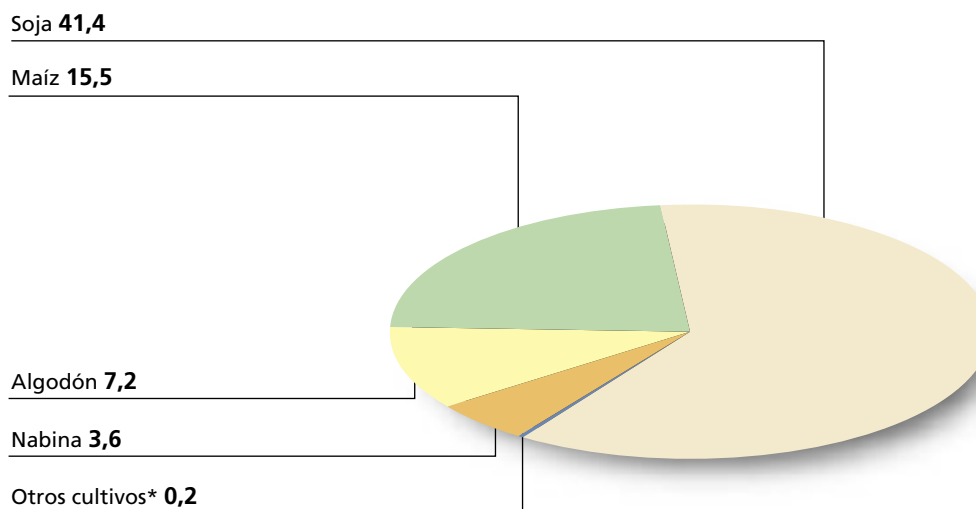
**FIGURA 5**  
**Superficie mundial plantada de cultivos transgénicos en 2002, por países**  
 (millones de ha)



\* Alemania, Australia, Bulgaria, Colombia, España, Honduras, India, Indonesia, México, Rumania y Uruguay.

Fuente: James, 2003.

**FIGURA 6**  
**Superficie mundial plantada de cultivos transgénicos en 2002, por cultivos**  
 (millones de ha)



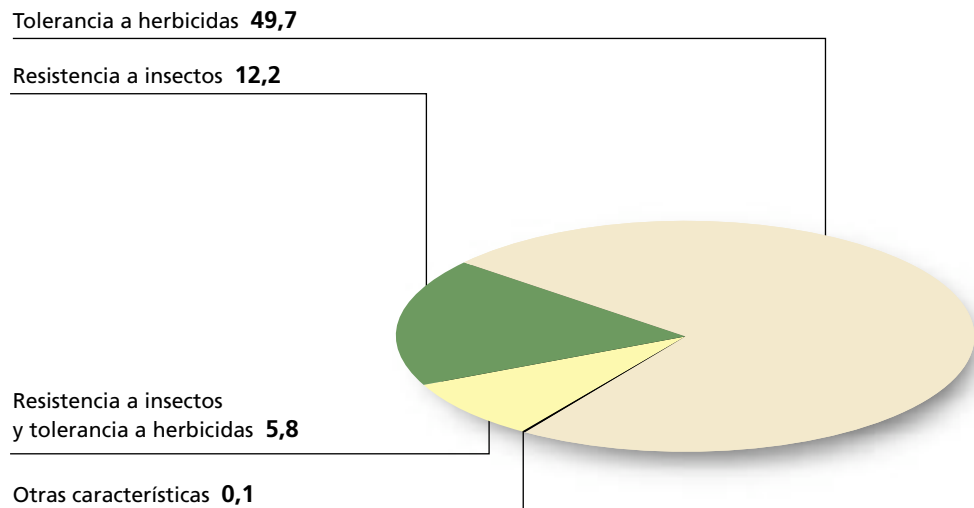
\* Incluye la calabaza y la papaya.

Fuente: James, 2003.



FIGURA 7

Superficie mundial plantada de cultivos transgénicos en 2002, por características (millones de ha)



Fuente: James, 2003.

respectivamente, de la superficie total destinada a estos cultivos (James, 2003). También se cultivan con fines comerciales pequeñas cantidades de papayas y calabazas transgénicas resistentes a virus. En la actualidad no se producen comercialmente en ningún lugar del mundo variedades transgénicas de trigo o arroz, que son los principales cereales alimentarios.

## Conclusiones

El desplazamiento de la investigación agrícola del sector público al sector privado transnacional ha tenido consecuencias importantes para los tipos de productos que se crean y comercializan. La investigación del sector privado se centra naturalmente en los cultivos y características de interés comercial para los agricultores de los países de ingresos más altos, con unos mercados de insumos agrícolas desarrollados y rentables. Los bienes públicos agrícolas, incluidos los cultivos y características de importancia para la agricultura de subsistencia en zonas marginales, revisten poco interés para las

grandes empresas transnacionales. ¿Podrán aprovecharse los países en desarrollo de los beneficios económicos indirectos que se derivan de los cultivos transgénicos creados y comercializados por el sector privado? ¿Qué prioridades deberían establecerse en la investigación para beneficiar más directamente a las personas pobres?

Una de las enseñanzas de la Revolución Verde fue que la tecnología agrícola podía ser transferida internacionalmente, en especial a los países que tenían suficiente capacidad nacional de investigación agrícola para adaptar los cultivares importados de alto rendimiento a las condiciones locales de producción. ¿Qué tipo de capacidad de investigación necesitan los países en desarrollo para beneficiarse de la Revolución Genética? Teniendo en cuenta la disminución progresiva de los fondos destinados a la investigación pública, ¿cómo se podrían movilizar más recursos para una investigación que favorezca a las personas pobres? ¿Cómo se podrían estructurar las asociaciones entre los sectores público y privado para aprovechar las ventajas de cada uno de ellos?

A diferencia de las variedades de alto rendimiento difundidas por la Revolución

Verde, los productos de la Revolución Genética están suscitando preocupación entre la opinión pública y tropezando con importantes obstáculos en el ámbito de la reglamentación y los mercados. ¿Cómo influyen estas cuestiones en la transferencia internacional de nuevas tecnologías? ¿Qué medidas normativas han de adoptarse para facilitar la circulación internacional de tecnologías?

Las variedades mejoradas que dieron origen a la Revolución Verde se difundieron libremente como bienes públicos internacionales. Muchas de las innovaciones de la Revolución Genética, por el contrario, están sujetas a patentes o licencias exclusivas. Aunque estas formas de protección de la propiedad intelectual han estimulado

enormemente la investigación privada en los países desarrollados, dicha protección puede limitar el acceso de otros investigadores a los instrumentos de la investigación. ¿Qué mecanismos institucionales se necesitan para promover la participación en la propiedad intelectual en el caso de la investigación de bienes públicos?

En la siguiente sección se retoman estas preguntas y se examinan los datos disponibles sobre cuestiones económicas (Capítulo 4) y científicas (Capítulo 5) relacionadas con los cultivos transgénicos y las preocupaciones de la opinión pública con respecto a su utilización (Capítulo 6). En la última sección se analizan medios para poner la biotecnología al servicio de las personas pobres.