



PONENCIA

**DIEZ REFLEXIONES SOBRE BIOTECNOLOGÍA AGRARIA**

Francisco García Olmedo.  
ETS de Ingenieros Agrónomos  
Departamento de Biotecnología. Universidad Politécnica de Madrid

Introducción

Retos actuales de la Agricultura

Cien siglos de mejora genética vegetal

*La domesticación de las plantas cultivadas*

*La etapa precientífica*

*Después de Mendel y Darwin*

*A modo de balance*

Nuevo tiempo de revolución

*El confuso lenguaje de la biotecnología*

*Organismos transgénicos*

Nociones sobre procedimientos

*Estrategias básicas*

Antiguas y nuevas aplicaciones

*Antes y ahora*

*Respuestas a los dos retos principales*

*Otros objetivos tradicionales*

Nuevos objetivos

Riesgos reales e imaginarios

*Conceptos generales*

*Seguridad para los humanos*

*Flujos génicos*

Seguridad para el medio ambiente

Evaluación del riesgo

*El concepto de “equivalencia substancial”*

La evaluación en la práctica

La biotecnología agrícola en España

*Especies importantes*

*La investigación*

*Ensayos de campo*

*Cultivos autorizados*

*Aceptación de los cultivos transgénicos*

El futuro europeo en el marco global

Bibliografía

## INTRODUCCIÓN

Este capítulo tiene por objetivo dar una visión sucinta sobre los nuevos avances de la biotecnología en relación con la práctica agrícola, como preámbulo del tratamiento de los aspectos económicos y legales del tema, especialmente referidos estos últimos a las circunstancias de nuestro país. Para cumplir dicho objetivo, se pretende resumir - en el lenguaje más sencillo posible – conceptos e ideas que hemos desarrollado de forma más extensa en otras publicaciones<sup>1-5</sup>. Para una visión más amplia de la biotecnología molecular y de la mejora genética clásica puede acudir a algunos textos recientes<sup>6-9</sup>.

En el ámbito tecnocientífico, el final del siglo XX viene marcado por dos revoluciones, una biológica y otra informática. La biológica se apoya en dos pilares: la capacidad de leer genomas completos de los seres vivos y la de transferir genes por ingeniería genética, más allá de las barreras sexuales de la especie.

En las aplicaciones de la ingeniería genética a las plantas cultivadas se han realizado mayores progresos que en las relativas a los animales, a pesar de que el problema de la transformación se resolvió antes en los animales que en las plantas. En la actualidad, se cultivan plantas transgénicas en más de 40 millones de hectáreas, distribuidas por una docena de países. Este avance se ha dado en las plantas porque se prestan más fácilmente que los animales a las alteraciones transgénicas, al ser organismos menos integrados funcionalmente y más plásticos desde el punto de vista genético.

Los últimos avances científicos y técnicos que se han incorporado a este proceso son el resultado de los nuevos conocimientos sobre las plantas que han propiciado la biología molecular y las posibilidades experimentales que ofrece la ingeniería genética vegetal. Los métodos moleculares no han de sustituir a la ya madura tecnología establecida sino que la complementan y le confieren nuevas posibilidades de aplicación. Antes como ahora, lo relevante es la naturaleza de la alteración genética introducida – la característica modificada – y no el método empleado para conseguirlo.

Antes de adentrarnos en la descripción de la nueva tecnología es preciso establecer cuales son los retos a los que pretende responder, así como hacer historia de la evolución de la tecnología genética a lo largo de los diez milenios transcurridos desde el invento de la agricultura.

## **RETOS ACTUALES DE LA AGRICULTURA**

La humanidad está mejor alimentada que nunca y la proporción de hambrientos ha disminuido, aunque no tanto como sería de desear. El número de personas con hambre estricta en África, Asia y América del Sur pasó de 935 millones en 1970 a 730 millones en 1990, a pesar de que en esas regiones casi se duplicó la población. Para el año 2020 se estima que la cifra de hambrientos podría reducirse hasta unos 600 millones de personas. Aun así, la desnutrición supone una de las mayores lacras actuales de la humanidad.

Los incrementos anuales en la producción de alimentos se están atenuando y factores esenciales de la producción agrícola, tales como la energía, el agua dulce y el suelo laborable, están al límite de su disponibilidad. Aunque se está retardando el crecimiento de la población mundial, la proyección más optimista para el año 2025 se cifra unos 7.800 millones de personas.

El principal factor limitante de la producción agrícola es el agua de riego. Ya se está destinando más del 54% del agua dulce accesible a usos humanos: agrícolas, industriales y urbanos. En la actualidad, 550 millones de personas padecen escasez de agua para sus usos más esenciales y, para el año 2025 pueden ser 3.000 millones los que se encuentren en esa situación. Todas estas consideraciones excluyen que el futuro incremento de la producción agrícola pueda venir sustancialmente de nuevas puestas en regadío. Solamente hay margen para mejorar la eficiencia del uso que estamos haciendo de este recurso, pero no para aumentar significativamente la cantidad global disponible.

Algo similar ocurre con el suelo laborable. Hace 40 años disponíamos de alrededor de media hectárea de suelo agrícola por persona. En la actualidad sólo se dispone de poco más de la mitad de esa cifra y, dentro de cuarenta años, es probable que la reducción alcance hasta un décimo de hectárea por persona. Esto es el resultado del aumento demográfico y de la dificultad de conseguir un aumento neto del suelo laborable.

Si queremos salvar nuestro futuro alimentario, no queda más opción que aumentar la productividad, pero una agricultura intensiva como la que se va a requerir no puede basarse en la tecnología actual. El uso intensivo de fertilizantes y de productos agroquímicos tiene un indudable impacto ambiental negativo.

Se hace necesaria la obtención de nuevas variedades de mayor rendimiento, menos sensibles a factores adversos y que requieran menos tratamientos agroquímicos. Además, para estos

tratamientos se deberán utilizar productos de nueva generación: más activos (eficaces a dosis menores que los actuales), más específicos (que no afecten a otros organismos distintos del nocivo) y biodegradables (que no se acumulen en el medio ambiente). En conclusión, los dos retos principales de la agricultura son la obtención de un mayor rendimiento por hectárea y el logro de una mayor compatibilidad con el medio ambiente: una agricultura más productiva y más limpia.

## **CIEN SIGLOS DE MEJORA GENÉTICA VEGETAL**

### **La domesticación de las plantas cultivadas**

La domesticación de las especies vegetales que hoy cultivamos fue el elemento culminante de la invención de la agricultura, invento que supuso el ensamblaje de aportaciones técnicas muy diversas. Para poner ciertas especies silvestres bajo su dominio, el ser humano debió introducir cambios sustanciales en los genomas de éstas. Dichos cambios fueron *contra natura* desde el principio, hasta el punto de que las especies domesticadas perdieron su capacidad de vivir por sí solas en la naturaleza y, en este sentido, dejaron de ser “naturales”.

Las alteraciones genéticas introducidas afectaron a caracteres de interés agronómico fundamental, cada uno de ellos dependiente de uno o pocos genes: semillas que no se dispersan en la madurez y que germinan de modo uniforme; frutos y semillas de mayor tamaño y maduración uniforme; o plantas de porte erecto. Algunos de estos caracteres fueron los que afectaron de forma severa a la posibilidad de supervivencia en vida libre de la especie domesticada.

Así por ejemplo, un cereal cuya espiga no disperse la semilla en la madurez (raquis tenaz) o una leguminosa que tenga dañado el mecanismo automático de apertura de la vaina al madurar son susceptibles de ser recolectadas, pero al mismo tiempo tienen severamente menguada su posible supervivencia en el medio natural porque ésta depende de una eficaz diseminación de la descendencia. Algo similar ocurre si las semillas tienen dañado el mecanismo de dormancia que determina su germinación escalonada: germinan sincrónicamente, a gusto del agricultor, pero son en extremo vulnerables en vida libre, ya que una primera humedad a destiempo puede acabar con su estirpe.

La domesticación alteró también las propiedades moleculares de los alimentos recolectados. En efecto, los frutos, semillas, raíces y tubérculos de las especies silvestres no parece que fueran creados para el sustento de la especie humana, a juzgar por las altas concentraciones de sustancias tóxicas e inhibitorias que poseen. Los humanos primitivos ya sabían que

“natural” no es sinónimo de bueno o inocuo. Así por ejemplo, la patata domesticada tiene bloqueada la ruta de síntesis de un alcaloide tóxico que en la silvestre se acumula a razón de un gramo por kilogramo de peso fresco.

Se operó en todos los casos sobre alteraciones accidentales de los genes, llamadas mutaciones, que, al ser deletéreas, no hubieran perdurado en la descendencia sin su concurso. Mucho más tarde se aprendería a favorecer la aparición de dichas mutaciones mediante agentes físicos o químicos (radiaciones, mutágenos) y recientemente, gracias a la ingeniería genética, se ha logrado dirigir las con gran precisión. Con independencia de la forma de obtenerla, el resultado de una mutación es la alteración de un gen y, por tanto, del carácter que éste determine. En consecuencia, lo importante es la naturaleza de la alteración y no el método seguido para lograrla.

### **La etapa precientífica**

Los mismos procedimientos genéticos que posibilitaron la domesticación sirvieron para introducir cambios adicionales en el genoma que mejoraron la aptitud para el cultivo y la adaptación de la especie doméstica a nuevos habitats. Así por ejemplo, la patata se importó por los españoles a Europa hacia 1570, pero tardó casi tres siglos en convertirse en una de las cosechas fundamentales del continente. Para implantarse en Europa, esta cosecha no sólo debió vencer los temores irracionales de sus habitantes, que preferían morir de hambre antes que consumirla, sino que debió someterse a alteraciones genéticas significativas: hubo de ser adaptada al régimen de día largo y a las condiciones de cultivo de los distintos sistemas agrícolas europeos.

A finales del siglo XVIII, existían unas cuarenta variedades de patata en Europa que diferían entre sí en caracteres tales como el tamaño y la forma del tubérculo, la pigmentación de la flor y de la piel del tubérculo, la maduración temprana o tardía, buenas o malas propiedades de almacenamiento e incluso la susceptibilidad a ciertas enfermedades. Toda esta variabilidad tenía como punto de partida un repertorio genético muy reducido, ya que fueron muy pocas las plantas (genotipos) importadas de América.

En el curso del siglo XVIII se generaliza el intercambio de material vegetal y el aprecio de las mejores variedades, tanto de especies leñosas como de herbáceas. Siguiendo con el mismo ejemplo, los mismos cultivadores descubren el inconveniente de producir la patata de siembra en su propia explotación y las ventajas de importar material sano desde zonas apropiadas. Estas circunstancias estimulan dos actividades fundamentales para la mejora vegetal: la

aplicación a ésta del método científico y el comienzo de una actividad comercial importante basada en ella.

En 1727 se creó la empresa de semillas Vilmorin en Francia, que ha perdurado hasta nuestros días. Louis de Vilmorin, miembro de la familia fundadora, ideó la prueba del pedigrí, método de evaluación de genotipos o de variedades, basado en los rendimientos de sus descendencias, que habría de dar excelentes resultados. Entre los logros importantes basados en este método destaca la mejora de la remolacha azucarera durante el periodo napoleónico.

El alemán Margraff observó en 1747 la presencia de azúcar (sacarosa) en las raíces de la remolacha, y su discípulo Achard desarrolló el procedimiento para su extracción industrial. Además, este último sometió a selección la variedad forrajera Blanca de Silesia, elevando su contenido en azúcar del 6 al 11 por ciento. Introducida esta variedad en Francia a principios del siglo XIX, los Vilmorin lograron elevar dicho contenido hasta el 16 por ciento mediante la aplicación del método del pedigrí.

La introducción de la hibridación en la mejora tuvo una enorme trascendencia porque supuso una forma de aumentar grandemente la variabilidad a partir de la cual se selecciona. En efecto, a partir de dos variedades - que han ido acumulando alteraciones genéticas por las infrecuentes mutaciones espontáneas - pueden generarse por hibridación una enorme gama de nuevas combinaciones de dichas mutaciones (no es este el lugar de explicar cómo ocurre lo que se denomina recombinación). Entre las nuevas combinaciones pueden seleccionarse aquellas que posean mejores propiedades agronómicas. Esta forma de generar variabilidad genética sigue siendo el motor de la mejora vegetal al cabo de más de dos siglos.

## **Después de Mendel y Darwin**

En la segunda mitad del siglo XIX ocurre el descubrimiento de las leyes que rigen la segregación de caracteres en la descendencia de los híbridos, la formulación de las hipótesis evolucionistas y la identificación de los cromosomas como sedes de la información genética. Bien entrado el siglo XX se culmina la gran síntesis mendeliano-darwiniana que vertebra la biología moderna.

Estos avances científicos tardaron mucho en influenciar las técnicas de la mejora vegetal, tecnología cuyo indudable éxito hace al que la practica un técnico conservador y poco abierto a la novedad. Cuando por fin la biología moderna acabó influenciando la mejora vegetal a

mediados del siglo XX. La mejora artificial de las plantas ha consistido desde su mismo origen en la imitación por el mejorador del proceso evolutivo natural.

En un principio, la mejora había aprovechado la diversidad existente mediante la selección artificial, y sólo en el periodo premendeliano había incidido con timidez en el proceso de creación de diversidad. La mejora vegetal moderna, según Borlaug, consiste en la introducción consciente de diversidad genética en las poblaciones - por cruzamiento de progenitores con características sobresalientes y complementarias – y en la selección de plantas con genes que confieren los caracteres agronómicos deseados, hasta alcanzar niveles altos de adaptación, uniformidad genética y estabilidad agronómica.

Los objetivos de la mejora vegetal han sido siempre los mismos: aumentar el rendimiento y mejorar la calidad nutritiva y tecnológica de los productos agrícolas. El rendimiento máximo de una especie cultivada es el de la mejor variedad, en el suelo más adecuado, el año más favorable, y está muy por encima del rendimiento medio que se alcanza en la práctica. Los rendimientos medios de las principales cosechas representan menos del 22 % de sus rendimientos récord (Tabla 1). La diferencia se debe sobre todo a los factores ambientales adversos, tales como la competencia de las malas hierbas, los suelos no óptimos y las condiciones meteorológicas desfavorables, así como a los efectos de plagas y enfermedades, causadas por insectos y microorganismos, respectivamente. La mejora se orienta con prioridad a obtener plantas menos vulnerables a factores adversos del suelo y del clima (plantas con mayor adaptabilidad), así como más resistentes a plagas y enfermedades, que al incremento del rendimiento potencial (rendimiento en condiciones óptimas).

Los métodos concretos aplicados a la mejora de una especie dada dependen de su forma de reproducción y propagación. Muchas de las plantas cultivadas se reproducen sexualmente y se propagan por semillas, mientras que algunas se propagan mediante la plantación de partes vegetativas o por injerto.

La mejora genética de los cereales - maíz, trigo y arroz, que se reproducen sexualmente - ha permitido mantener el incremento de la producción de alimentos por delante del crecimiento demográfico en la segunda mitad del siglo. El maíz es una planta de polinización cruzada o alógama, mientras que el trigo y el arroz son plantas autógamas, que se autofecundan



**Tabla 1.**

Rendimientos y pérdidas.

Cifras medias para las 8 cosechas principales en EEUU \*

Concepto	Cantidad (%)
Rendimiento récord	100
Rendimiento medio	21,6
Pérdidas por malezas	2,6
Pérdidas por plagas	2,6
Pérdidas por enfermedades	4,1
Pérdidas por otras causas	69,1

\* adaptado de J. S. Boyer, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 218:443-448 (1982)

El político norteamericano H. R. Wallace creó en los años 20 la primera empresa de semillas híbridas de maíz, Pioneer Inc. Esta empresa se originó para explotar el vigor híbrido o heterosis, que es el aumento del vigor y del rendimiento que se produce en un híbrido con respecto a sus progenitores.

Las variedades tradicionales, que permitían al agricultor usar como semilla el grano cosechado por él, acabaron desapareciendo ante los rendimientos superiores de las variedades híbridas, cuya semilla debía comprarse cada año. Los costes de producción de semilla híbrida disminuyeron de forma notable como resultado de dos innovaciones técnicas: los híbridos dobles, obtenidos a partir de dos híbridos sencillos (a partir de 4 líneas puras), y la manipulación genética de la esterilidad masculina (androesterilidad), que ahorraba la mano de obra necesaria para la eliminación manual de la flor masculina.

Las nuevas variedades de maíz daban mayores rendimientos, eran más resistentes a plagas y enfermedades y tenían un tallo corto y robusto que permitía cosechar de forma mecánica. En algunas zonas productivas de Estados Unidos, los rendimientos medios obtenidos por los agricultores se fueron aproximando a los obtenidos en las estaciones experimentales. Los agricultores debían comprar cada año la semilla híbrida, ya que la semilla producida por el híbrido no es homogénea, pero se veían compensados de forma clara por el incremento del rendimiento.

No se han desarrollado variedades híbridas de trigo por dos circunstancias: la hibridación manual es costosa en extremo (comercialmente imposible), ya que se han de eliminar con unas pinzas tres anteras por cada flor de las numerosas que forman cada espiga, y un alopoloide

como es el trigo, al incorporar más de un tipo de genoma, es como si fuera un híbrido permanente, por lo que no cabe esperar tanta heterosis como en el maíz. La hibridación manual se ha empleado en el trigo sólo para crear diversidad.

Norman E. Borlaug, en el Centro Internacional de Mejora de Maíz y Trigo (CIMMYT) en Méjico, habría de llevar la mejora de esta especie a sus más altas cimas, labor que fue reconocida con la concesión del premio Nobel de la Paz en 1970. La aportación de Borlaug incidió en el rendimiento potencial, al conseguir unas variedades semienanas con alto índice de cosecha, y afectó a la capacidad de adaptación de las nuevas variedades a condiciones agronómicas muy diversas.

Hasta entonces se consideraba un dogma de la mejora vegetal que para obtener variedades bien adaptadas y de alto rendimiento había que hacer la selección en las mismas localidades donde iban a ser cultivadas. Imprevisiblemente, Borlaug refutó este dogma con sus resultados experimentales. Con objeto de acortar de 8 a 4 años el tiempo necesario para obtener una nueva variedad, este investigador decidió realizar dos ciclos completos de mejora por año. Para ello, eligió en Méjico dos campos experimentales de características muy distintas, separados entre sí por 10° de latitud (diferentes en la duración del ciclo día/noche) y por 2.600 metros de altitud. Las variedades obtenidas - seleccionadas por su buen rendimiento en dos ambientes tan dispares - resultaron ser capaces de dar altos rendimientos no sólo en Méjico, sino también en una variada gama de suelos y climas de todo el mundo, algo que hasta entonces se consideraba imposible.

La mejora del arroz se realizó a partir de 1958 de modo similar al trigo en el International Rice Research Institute (IRRI; Los Baños, Filipinas). Las variedades de alto rendimiento poseían caracteres bien concretos: ciclo corto (posibilidad de dos cosechas por año), floración independiente de la duración del día, talla semienana, resistencia a las plagas y enfermedades predominantes y buenas propiedades culinarias.

### **A modo de balance**

La mejora no se ha restringido a las especies que hemos tomado como ejemplo, aunque éstas son las más importantes, sino que ha incidido sobre todas las especies de interés agronómico. Por ejemplo, en Estados Unidos, la producción media de las 17 cosechas principales se multiplicó por un factor de 2,4 entre 1940 y 1980, sin apenas incrementar la superficie en cultivo. Y entre 1950 y 1992, el grano disponible por habitante y año pasó de 250 kg a más de

350 kg a escala global, y de 170 kg a 250 kg en los países en desarrollo. De hecho, según datos del Banco Mundial (Tabla 2), en los últimos años se han producido aumentos en la producción de alimentos por habitante en todas las áreas geográficas, con excepción del Sahel.

**Tabla 2.**

Variaciones de la disponibilidad de alimento per cápita en la década 1980-1990

Países	Renta per cápita (dólares)	Variación (%)
Todo el mundo	4.200	+12
Países pobres	350	+20
Países intermedios	840	+16
China e India	360	+29
Sahel (Sur del Sahara)	340	- 10
Oriente próximo y norte de África	1.790	+ 3
América latina y Caribe	2.180	+ 6
Países de la OCDE	20.170	+ 2

## **NUEVO TIEMPO DE REVOLUCIÓN**

### **El confuso lenguaje de la biotecnología**

La rapidez de los cambios introducidos por los nuevos avances de la biotecnología en general y de la aplicada a las plantas, en particular, han perturbado el buen uso del lenguaje. Denominaciones tales como organismos genéticamente modificados (OGMs), alimentos transgénicos, ingeniería genética, ADN recombinante, transferencia génica, clonación, alimentos naturales, mejora genética e, incluso, biotecnología han aparecido en el lenguaje cotidiano de forma desordenada e inexacta, lo que hace precisas algunas aclaraciones pertinentes.

La definición de biotecnología abarca a todas las tecnologías mediadas por un ser vivo o por partes de él, sean éstas células o enzimas aisladas. Bajo esta definición se incluyen desde la propia agricultura, inventada hace diez milenios, y la inmemorial fabricación de la cerveza, hasta la última forma de producir insulina humana. No es apropiado, por tanto, usar el término de forma restringida para referirse exclusivamente a los últimos avances basados en la biología

molecular. Para esto último resulta más adecuado el uso de la expresión “biotecnología molecular”, concepto que cubre todas las tecnologías asociadas al manejo del ADN en el tubo de ensayo.

Prácticamente todo el alimento que consumimos ha sido genéticamente modificado. La domesticación de plantas y animales supuso una alteración muy drástica de sus genomas y la mejora genética subsiguiente ha ido añadiendo modificaciones extensas y sustanciales. La ingeniería genética es sólo un método más - una modalidad más de mejora genética - y sólo sirve para modificar uno o pocos genes de forma muy selectiva. No serviría para obtener razas de perro tan distintas – en su tamaño, morfología y temperamento - como el chihuahua y el pit bull terrier, que en cambio han surgido de la mano del hombre gracias a los métodos genéticos más tradicionales. En consecuencia, resulta absurdo denominar OGMs sólo a los productos de la ingeniería genética para contraponerlos a los supuestamente “naturales”.

Ya hemos indicado que nada de lo que consumimos es natural, debido a que la mayoría de los organismos de los que derivamos nuestro alimento han perdido su capacidad de sobrevivir en vida libre. Es más, han debido sufrir alteraciones genéticas que les eliminen sustancias naturales que son tóxicas o inhibitorias para el ser humano. Una variedad moderna, modificada por ingeniería genética, está tan lejos de ser natural como las que la precedieron. ¡Por fortuna! Ya que – insistimos - natural no es sinónimo de inocuo.

## **Organismos transgénicos**

Son organismos transgénicos aquéllos cuyo genoma ha sido alterado por ingeniería genética o, si se prefiere, por sastrería genética, ya que las operaciones fundamentales de esta vía experimental consisten en cortar y coser (unir) piezas de ADN. Un gen es un tramo de ADN (una secuencia construida con las bases A,T,G,C) que, en general, determina una proteína (una secuencia de aminoácidos), de acuerdo con las equivalencias plasmadas en la clave genética. Mediante la nueva tecnología se puede alterar un genoma por la adición de uno o varios (pocos) genes que previamente no formaban parte de él o por la inutilización de uno o varios genes entre los ya existentes. Estas operaciones se hacen para conferir caracteres deseables y para eliminar caracteres indeseables del organismo, respectivamente, objetivos que no difieren de los de la mejora genética tradicional.

En lo que sí difieren la vieja y la nueva tecnología es en el repertorio génico que se puede manejar - genes de la misma especie, en el caso de la vieja, y de cualquier especie, en el de la

nueva - y en el modo de introducir y transferir la modificación genética, por vía sexual o por adición exógena (transformación), respectivamente. Los organismos modificados por transformación se suelen denominar transgénicos. Llamar transgénicos a los alimentos derivados de dichos organismos resulta menos apropiado. Por ejemplo, es absurdo llamar transgénico al azúcar procedente de una remolacha transgénica, ya que es un producto químico puro, esencialmente indistinguible del aislado de la remolacha normal o de la caña de azúcar.

Al principio de los años 50, Watson y Crick confirmaron la naturaleza molecular del material genético, iniciando así el desarrollo de la biología molecular que dos décadas más tarde alumbraría métodos para aislar genes, para determinar su secuencia de bases, para recomponerlos en el tubo de ensayo y para devolverlos a una célula viva del mismo o de distinto organismo del inicial. El problema de introducir genes foráneos en plantas (transformación) no se resolvió hasta 1982, en el Laboratorio de Genética de la Universidad de Gante, gracias a Mark Van Montagu y Jeff St. Schell, en competencia con la norteamericana Mary Dell Chilton y con la empresa Monsanto.

### **Nociones sobre procedimientos**

Se sabía desde antiguo que la bacteria *Agrobacterium tumefaciens* inducía tumores en el tallo de muchas plantas y se suponía que lo conseguía por influencia externa de alguna sustancia que ella misma fabricaba. Van Montagu y Schell lograron demostrar que la bacteria introducía un trozo de su propio ADN en la célula vegetal, que este ADN se integraba en un cromosoma de dicha célula y, finalmente, que los genes incluidos en el ADN transferido se expresaban. Una vez resuelto este problema, inventaron cómo alterar la bacteria para que introdujera en la célula vegetal cualquier gen de interés.

Para crear una planta transgénica es preciso integrar una pieza apropiada de ADN en el genoma de una célula y después regenerar una planta completa a partir de dicha célula. Al contrario de otros tipos de organismos, las plantas tienen la singularidad de que sus células son totipotentes (capaces de regenerar el organismo completo) si se las cultiva en medios adecuados. La introducción de ADN foráneo (transformación) y posterior regeneración es fácil en algunas especies, tales como tomate, patata, tabaco, colza o la antes mencionada *Arabidopsis thaliana*, mientras que algunas plantas de gran cultivo, tales como trigo, cebada, maíz y arroz, son más difíciles de transformar y requieren considerable experiencia en el cultivo

de tejidos. Una vez integrados, los genes se transmitirán a la descendencia del mismo modo que lo hacen los que componen el genoma original.

Para transformar aquellas especies más refractarias al método del *Agrobacterium* se han desarrollado métodos que permiten introducir ADN de forma directa en cualquier célula. Entre estos, merece mención especial el llamado método biolístico o de microbombardeo. Partículas microscópicas de oro o wolframio se revisten con el ADN que se quiere introducir y luego se depositan en la punta de una bala macroscópica. El conjunto se acelera por pólvora, por descarga eléctrica o por helio a presión en un dispositivo, que vulgarmente llamamos la pistola génica, y la bala macroscópica es parada por un tope a la salida del cañón, el cual interrumpe su camino pero no impide que los microproyectiles sigan el suyo hasta penetrar en el tejido vegetal expuesto. Estas partículas recubiertas de ADN atraviesan la pared y la membrana celulares, introduciéndose en la célula sin afectar su viabilidad.

#### Estrategias básicas

Sabemos que un gen es un tramo de ADN (una secuencia de bases) que, en general, determina una proteína (una secuencia de aminoácidos), de acuerdo con las equivalencias plasmadas en la clave genética. No todo el tramo de ADN al que llamamos gen en términos moleculares se transcribe y se traduce; sólo lo hace una región que denominamos codificante. Esta región está precedida por otra no transcrita, que se designa promotor, y seguida por un tramo donde residen las señales de terminación.

En la región codificante - que en organismos superiores puede ser discontinua - reside la información que determina la estructura del producto génico (proteína), mientras que en el promotor se concentran la mayor parte de los receptores informáticos del gen, los cuales determinan en qué células se ha de fabricar la proteína que codifica, en qué periodo del desarrollo del organismo (o en respuesta a qué estímulo externo) y en qué cantidad.

Los genomas de los organismos superiores se componen de decenas de miles de genes y de una proporción variable de ADN repetitivo para el que no se ha encontrado una función. El conocimiento completo de un genoma implica la determinación de la secuencia de bases de todo el ADN que lo compone. Un genoma vegetal puede tener un tamaño entre 150 y 16.000 millones de bases y contener entre 20.000 y 30.000 genes

Aparte de la investigación de los promotores génicos, interesa la de las piezas de la maquinaria celular que son las proteínas, cuyas estructuras están determinadas por las partes codificantes de los genes. Se siguen dos estrategias principales: bloqueo del gen para examinar las consecuencias de la ausencia de la proteína correspondiente y, alternativamente, hacer que

aparezca la proteína de interés en una célula o tejido donde antes no estuviera presente – alterando convenientemente el promotor – para averiguar los efectos de dicha presencia. Estas estrategias no sólo son básicas para los avances del conocimiento botánico sino también para la mejora genética molecular: para añadir caracteres de interés o para eliminar caracteres perjudiciales en una variedad cultivada. Examinemos los objetivos de la mejora molecular.

Antiguas y nuevas aplicaciones biotecnológicas

## Antes y ahora

Antes del desarrollo de la ingeniería genética, el mejorador forzaba la generación de variabilidad y luego descartaba la mayor parte de las variantes generadas, seleccionando sólo una mínima fracción de ellas. Ahora se trata de aumentar la variabilidad de la planta de interés mediante la adición o alteración de unos pocos genes elegidos *a priori*, por lo que se hace innecesaria, o se reduce en extremo, la selección posterior.

Ya hemos dicho que los métodos moleculares de mejora no sustituyen a los mendelianos sino que los complementan. En general se parte una variedad productiva obtenida por los métodos tradicionales para abordar la mejora molecular. Las técnicas de la mejora clásica siguen siendo óptimas para el manejo de caracteres que dependen de muchos genes, como, por ejemplo, el rendimiento potencial, mientras que las de ingeniería genética ofrecen indudables ventajas para la mejora de caracteres que dependen de uno o pocos genes, como ocurre con la resistencia genética a plagas y enfermedades.

Respecto a los objetivos de la mejora, en la nueva etapa se siguen asumiendo los de las etapas anteriores, pero se abre la posibilidad de plantear otros nuevos que no se podían abordar con las técnicas clásicas. Entre los objetivos heredados hay que distinguir los que responden a los retos fundamentales de la agricultura – que, recordemos, debe ser más productiva y más limpia – de los que responden a otras demandas sociales, sean de la industria o de los consumidores.

Entre los objetivos nuevos se incluyen todos aquellos que implican la introducción de genes que proceden de fuera del reino vegetal para obtener aplicaciones o productos distintos de lo tradicionales: nuevos productos industriales no alimentarios – como por ejemplo, plásticos biodegradables – que pueden suponer una significativa demanda potencial de suelo laborable; productos farmacológicos, de alto valor añadido y baja demanda de suelo; plantas útiles para la descontaminación ambiental (fitoremediación) o para otras aplicaciones medioambientales. Se ha progresado en distinto grado para los distintos objetivos propuestos: mientras que en

unos casos se ha aprobado el uso comercial de variedades transgénicas, en otros se está en fase de laboratorio, de ensayo de campo o no se ha pasado del terreno de la hipótesis.

### Respuesta a los dos retos principales

La nueva tecnología está ya incidiendo sobre los objetivos que tienen que ver con un aumento de la productividad y con la práctica de una agricultura más compatible con el medio ambiente (Tabla 3).

**Tabla 3.**

Objetivos relacionados con el rendimiento y con una menor contaminación

Tipo de objetivo	Ejemplos
Alteración de la reproducción	Androesterilidad y restauración de ésta (para obtención de híbridos) Adelanto de la floración en plantas leñosas Frutos partenocárpicos (sin semillas)
Resistencia a plagas y enfermedades	Resistencia a insectos (proteína Bt)
Resistencia a herbicidas	Resistencia a glifosato (round up) Resistencia a fosfinotrician (basta)
Resistencia a factores del suelo	Resistencia a la salinidad Resistencia a la acidez del suelo
Resistencia a factores climáticos	Resistencia al choque térmico Resistencia a la helada Resistencia al estrés oxidativo

La primera aplicación importante de índole molecular que ha encontrado gran aceptación entre los mejoradores comerciales no ha implicado la obtención de plantas transgénicas. Se trata de la elaboración de mapas de marcadores moleculares de los genomas de las principales especies cultivadas. En uno de estos mapas es posible situar los genes responsables del control genético de cualquier carácter agronómico de interés (resistencia a una enfermedad,



talla baja, maduración temprana, etc.), lo que simplifica sobremanera algunas de las manipulaciones de la mejora clásica, tanto de los caracteres mono u oligogénicos como de los poligénicos.

Otra aportación de gran trascendencia consiste en la obtención de híbridos por ingeniería genética de especies en las que no era factible. Esto permite extender o facilitar la explotación de la heterosis o vigor híbrido a numerosas especies, tales como la colza o la endivia.

En general, tienen alta prioridad todas las modificaciones que afectan a los mecanismos de reproducción de las plantas. Así por ejemplo, la obtención de frutos sin semillas (partenocárpicos), o el adelanto en años del momento de floración en especies leñosas, mediante ingeniería genética, son ya realidades aunque no hayan alcanzado todavía el mercado. El conocimiento básico sobre los modos de respuesta de las plantas a los retos de la sequía, de los factores adversos del suelo (la salinidad o la acidez) y de los del clima (fríos o calores extremos) ha experimentado avances muy notables. Sin embargo, la complejidad de los mecanismos involucrados ha dificultado hasta ahora la traducción de estos avances en aplicaciones prácticas.

Las innovaciones de la ingeniería genética relacionadas con la obtención de plantas transgénicas resistentes a herbicidas, microorganismos patógenos y plagas de insectos inciden sobre el rendimiento, al evitar pérdidas importantes, sobre los costes de producción, al ahorrar mano de obra y productos químicos, y sobre el impacto ambiental, al disminuir el uso de estos últimos y paliar la erosión. En efecto, el uso de productos fitosanitarios (herbicidas, plaguicidas, fungicidas, etc.) representa no sólo un capítulo de gastos importante en la producción agrícola sino que plantea serios problemas de contaminación del medio ambiente.

Los estudios moleculares han permitido caracterizar los genes de defensa que los mejoradores venían manipulando empíricamente y diseñar nuevas estrategias de lucha que implican una reducción considerable en el uso de los mencionados productos. Hay que citar también las plantas resistentes a distintos tipos de virus, ya que para estos se conocían hasta ahora pocas fuentes de resistencia genética y se carecía de métodos curativos

La primera generación de plantas transgénicas resistentes a insectos es ya comercial. La resistencia se basa en la expresión de distintas variantes de una proteína bacteriana, la proteína *Bt*, que tiene propiedades insecticidas y que procede de la bacteria *Bacillus thuringiensis*. Se conocen variantes de esta proteína *Bt* capaces de dañar de manera específica a distintos tipos insectos. Esta propiedad, su especificidad, ha hecho que la bacteria liofilizada (desechada) se haya usado como insecticida desde casi medio siglo, ya que permite

combatir una plaga determinada sin dañar a otros insectos o a otros animales. Además, por ser fácilmente biodegradable, no perjudica al medio ambiente. La posibilidad de expresar el gen que codifica la proteína *Bt* en la planta facilita una aplicación agrícola más limpia y eficaz.

### Otros objetivos tradicionales

La mejora genética tradicional ha venido persiguiendo objetivos que aunque no corresponden a los retos fundamentales de la agricultura, representan demandas sociales diversas que están plenamente justificadas, tales como la mejora de los distintos tipos de calidad (Tabla 4).

La mejora de la calidad nutritiva de los productos agrícolas y de sus propiedades tecnológicas relacionadas con la recolección mecánica, la distribución y el procesamiento industrial ha sido desde antiguo uno de los objetivos de la mejora genética. La ingeniería genética ofrece múltiples oportunidades de incidir sobre estos aspectos. El retraso de la maduración de los frutos o de la senescencia de las flores, la alteración de la composición nutritiva de los alimentos o la alteración de sus propiedades organolépticas son otras de las modificaciones posibles.

#### Tala 4.

Objetivos tradicionales que también aborda la ingeniería genética

Tipo de objetivo	Ejemplos
Alteraciones morfológicas y ornamentales	Talla de la planta (enanismo*) Color y forma floral Arquitectura vegetal
Calidad nutritiva	Aminoácidos esenciales Enriquecimiento en vitamina A Enriquecimiento en hierro Eliminación de alergen Eliminación de toxinas
Calidad organoléptica	Prevención de la decoloración Proteínas edulcorantes Modificación de aromas
Calidad tecnológica	Maduración controlada Consistencia del fruto en el transporte Alteración de la lignina

\*La talla también afecta al rendimiento

## Nuevos objetivos

Las plantas pueden alterarse por ingeniería genética con fines distintos de los tradicionales. En este sentido cabe señalar su posible uso como bioreactores y como agentes para la descontaminación (Tabla 5).

Gran parte de la actividad agrícola está encaminada a la recolección de órganos y tejidos de reserva (granos de cereales o leguminosas, tubérculos de patata, raíces de remolacha, etc.) o, si se quiere, de las proteínas, hidratos de carbono y lípidos (grasas) contenidos en ellos. Las plantas producen diversos tipos de biopolímeros, entre los que cabe destacar por su abundancia la celulosa, que es biodegradable pero no digerible por el hombre, y el almidón, que es la principal fuente de las calorías de nuestra dieta. Ahora se puede hacer que las plantas produzcan biopolímeros no vegetales de interés industrial.

### Tabla 5.

Nuevos objetivos de la ingeniería genética vegetal

Tipo de objetivo	Ejemplos
Las plantas como bioreactores	
Productos de alto consumo	Producción de plásticos biodegradables Producción de aceites industriales
Productos de alto valor añadido	Producción de hormonas y fármacos Producción de vacunas y anticuerpos
Fito-remediación	Plantas para recuperar suelos contaminados con arsénico, metales pesados y otros productos

Las materias primas para fabricar estos productos finales son sintetizadas en el tejido foliar y transportadas al tejido de reserva. La nueva tecnología permite cambiar el producto acumulado en dicho tejido: basta con bloquear la ruta de síntesis del producto habitual, e introducir los genes que codifican las enzimas necesarias para la síntesis de un producto alternativo.

Por ejemplo, una especie bacteriana (*Alcaligenes eutrophus*) fabrica un tipo de polímero de reserva (polihidroxibutirato y otros polihidroxiácidos; PHAs) cuyo interés radica en que sirve como materia prima para la fabricación de envases y utensilios de un plástico biodegradable. Se ha visto que la expresión transgénica en plantas de los genes bacterianos que determinan la síntesis de PHAs confiere a éstas la capacidad de acumular dicho plástico. Además, se ha podido restringir la acumulación a los compartimentos donde se almacena el almidón en los tejidos de reserva, donde no tiene efectos deletéreos para la planta y donde la recolección es fácil. También, en la planta de algodón, se ha logrado incorporar los PHAs a las propias fibras celulósicas, dando lugar una fibra textil con nuevas propiedades.

Lo mismo que se han empleado bacterias, levaduras o animales para producir por ingeniería genética numerosos productos de interés farmacológico - tales como hormona del crecimiento, insulina, antígenos para vacunas, anticuerpos, hormonas peptídicas, etc. – pueden utilizarse las plantas con el mismo fin. El que sean más apropiadas que los otros tipos de organismos depende en cada caso de los costes de producción y purificación. De cualquier manera, estas aplicaciones de las plantas carecen de relevancia agronómica porque requieren muy poca extensión de suelo laborable.

En los últimos años se ha puesto de manifiesto que ciertas plantas pueden ser utilizadas para regenerar suelos contaminados, aplicación a la que se suele denominar "fitorremediación". El uso de plantas transgénicas para este fin es todavía incipiente, pero ya se tienen algunos resultados esperanzadores. Dentro de este tipo de aplicación, pueden citarse unas plantas transgénicas de *Arabidopsis* que contienen el gen de una enzima que transforma el ión mercúrico y que parecen ser eficaces en la recuperación de suelos contaminados por mercurio. También se han obtenido plantas que expresan genes que codifican enzimas que son capaces de degradar compuestos orgánicos, tales como nitroglicerina o cloroformo).

## **RIESGOS REALES E IMAGINARIOS**

### **Conceptos generales**

Hablar de los riesgos de las plantas transgénicas y de los alimentos derivados de ellas – como de los de cualquier otra tecnología, sea la eléctrica o la del acero – no cabe hacerlo más que aplicación por aplicación. De hecho, la aprobación del cultivo y consumo de plantas transgénicas se hace caso por caso, según un riguroso proceso en el que se tienen en cuenta

todos los riesgos imaginados, por desdeñables que parezcan. Nunca en la historia de la innovación se han tomado precauciones tan extremas. En todo caso, el cultivo aprobado es sometido a seguimiento y la autorización puede ser revocada en cualquier momento en que surja una alarma fundada.

No existe el riesgo nulo. Toda actividad humana conlleva un cierto riesgo que ha de ser siempre evaluado en función de los beneficios que dicha actividad reporta: la vacuna de la viruela causó problemas serios a algunos individuos, pero salvó millones de vidas. Las aplicaciones de los nuevos avances biológicos pueden comportar algunos riesgos, pero éstos son evitables mediante la restricción o la prohibición de aquellas aplicaciones que sean peligrosas.

Además, la manipulación genética de las plantas cultivadas ha tenido como uno de sus objetivos, desde el neolítico hasta la actualidad, la eliminación de algunos riesgos de los productos naturales, tales como la presencia de sustancias tóxicas: la cereza silvestre posee sustancias nocivas que fueron eliminadas por selección gracias a que el mal sabor asociado a ellas o su toxicidad manifiesta permitían detectar su presencia sin recurrir al análisis bioquímico. Por otra parte, en algunos casos se ha seleccionado a favor de la presencia de sustancias nocivas: en ciertas variedades de pimiento - algunas muy apreciadas - se encuentran concentraciones altas de capsaicina, una sustancia citotóxica que destruye las membranas celulares empezando por las de las propias papilas gustativas.

Entre los posibles riesgos que puedan derivarse de la producción y consumo de productos vegetales transgénicos hay que distinguir los que incidirían de un modo directo en el hombre y los que afectarían de distintas formas al medio ambiente.

### **Seguridad para los humanos**

Es evidente que las proteínas codificadas por los genes ajenos que se introducen en una planta transgénica - o las sustancias cuya síntesis pueda depender de dichas proteínas - deben carecer de toxicidad para el hombre. Si expresamos en el tomate el gen de la toxina botulínica, incurrimos en un riesgo cierto y de graves consecuencias. De aquí que la aprobación de productos transgénicos deba hacerse caso por caso y que la carencia de toxicidad se deba averiguar en los antecedentes bibliográficos e investigar según ensayos bien establecidos.

Otro aspecto a considerar es la posible alergenicidad de las plantas transgénicas. El polen del ciprés o del chopo, la harina de trigo o de soja, las almendras y otros frutos secos, las frutas, los mariscos y tantos otros alimentos habituales con los que estamos en contacto pueden

causar reacciones alérgicas en individuos susceptibles. La introducción de genes ajenos implica añadir nuevos componentes que se irán a sumar a las decenas de miles que ya componen cualquier alimento. Algunos de estos componentes ajenos pueden poseer propiedades alérgicas notables y en ese caso debe evitarse su incorporación por expresión transgénica.

No sólo se excluye transferir genes que codifiquen alérgenos conocidos sino que también se evita, en principio, transferir genes procedentes de organismos de los que se derivan alimentos que producen alergia, a no ser que se demuestre que el gen en cuestión codifica una proteína que no es responsable de la alergia observada.

Finalmente, carece de fundamento en términos reales el miedo a que los genes incorporados al alimento transgénico puedan incorporarse a nuestro propio organismo. Después de todo, llevamos consumiendo durante cientos de milenios células animales que poseen los genes necesarios para fabricar cuernos y no se ha observado ningún ser humano con tal característica.

## **Flujos génicos**

Una preocupación muy generalizada es la de que los genes añadidos a un organismo transgénico se transfieran a otros organismos. Los genes (uno o pocos) foráneos añadidos se incorporan al genoma de la planta que, como ya se ha dicho, contiene entre 20.000 y 30.000 genes. Una vez incorporados, estos genes corren la misma suerte que los preexistentes en el genoma. El flujo génico de unos genomas a otros es muy limitado, pero ocurre en ciertas circunstancias. Veamos en cuáles es improbable y en cuáles no puede descartarse.

No debemos temer la transferencia de genes desde el genoma vegetal - transgénico o no – a los microorganismos del tracto digestivo. No se ha observado dicha transferencia en experimentos especialmente diseñados para tal propósito y, por otra parte, tampoco es ésta de esperar desde el punto de vista teórico. Los genes de resistencia a antibióticos, que se emplean como auxiliares en la ingeniería genética, han sido especialmente señalados en este contexto, ya que de transferirse, interferirían con el uso clínico del antibiótico correspondiente. A pesar de no existir un riesgo objetivo y de que los antibióticos afectados ya no se usan en clínica, se ha acordado no utilizar en el futuro dichos genes y sustituirlos por otros como auxiliares.

Una segunda vía de posible flujo génico a considerar es la transmisión por polen a plantas cultivadas de la misma o de distinta especie y a plantas de especies silvestres. Para que dicha vía opere es preciso que se den las siguientes circunstancias: que el polen sea transportado,

que la planta receptora esté en el momento apropiado para ser polinizada, que el polen sea compatible, que la planta resultante sea fértil y que su descendencia sea viable.

En el caso de plantas no transgénicas de la misma especie, el riesgo es desdeñable si son autógamas (autofértiles), y medible, si no lo son. Si la semilla es híbrida, como en el maíz, no hay riesgo de transmisión a la descendencia, por lo que basta con rodear la parcela de maíz transgénico con varias filas de maíz no transgénico, para que las parcelas próximas no reciban polen transgénico por encima de los límites legales. De todas formas, existen soluciones tecnológicas que, por así decirlo, pueden hacer inviable el polen en plantas distintas de la transgénica.

No hay posibilidad de que el polen transgénico fertilice plantas cultivadas de otras especies y, aunque de forma restringida, sí la hay de que lo haga a especies silvestres taxonómicamente próximas. Como ya hemos dicho, una vez incorporado a un genoma, el gen foráneo corre la misma suerte que el resto de los miles de genes de dicho genoma. La transferencia a otras especies ocurre con muy baja frecuencia y hay que distinguir entre distintas situaciones.

No hay problema si no hay una especie silvestre afín en el hábitat donde se lleva a cabo el cultivo o si la especie cultivada es autógama. Si la planta es alógama, se pueden dar circunstancias de distinta probabilidad según la mayor o menor facilidad con que se produzca la fertilización cruzada. Así por ejemplo, la colza representa una situación de probabilidad más baja que la alfalfa. En Canadá se han sembrado varios millones de hectáreas de colza transgénica y se lleva a cabo un seguimiento exhaustivo. Hasta ahora no hay motivo para la alarma

La posibilidad de que se generen “supermalezas” al hacer las plantas cultivadas resistentes a ciertos herbicidas carece de fundamento, aunque la maleza que recibiera el gen de resistencia no sería controlable por el herbicida concreto en la parcela de cultivo, pero no le supondría ventaja alguna fuera de ella. Por otra parte, es muy improbable que la adición de uno o pocos genes a una planta cultivada la asilvestren. Como se ha discutido ya, el proceso de domesticación es complejo y supone cambios radicales en el genoma, por lo que en esencia no es reversible por la introducción de características agronómicas adicionales.

Se han expresado dudas sobre la estabilidad y localización de los genes foráneos que se incorporan a una planta transgénica. Esto no son más que problemas técnicos de fácil solución que en ningún caso suponen un riesgo. Si debe someterse a un escrutinio cuidadoso la incorporación de genes que codifican proteínas de virus, ya que, aunque confieren resistencia al virus, pudieran en algunos casos dar lugar a cepas virales recombinantes.

## **Seguridad para el medio ambiente**

Aparte de los flujos génicos que acabamos de considerar, el riesgo que las plantas transgénicas podrían suponer para el medio ambiente tiene dos vertientes principales: la inducción de resistencia a los productos transgénicos por parte de los patógenos y de las plagas que se quieren controlar con dichos productos y los posibles daños de la planta transgénica a otros organismos que entren en contacto con ella.

La posible inducción en un organismo de resistencia al principio activo que se usa para combatirlo es un problema común a los antibióticos, a los productos fitosanitarios convencionales y, por supuesto, a las plantas transgénicas. El uso de estrategias de aplicación que retrasen al máximo la aparición de dicha resistencia es de interés tanto para la empresa de semillas como para el agricultor.

En cualquier caso, la posibilidad de aparición de resistencia no justifica dejar de usar un sistema de protección mientras funcione, del mismo modo que el que un antibiótico vaya a dejar de ser eficaz no implica que no lo usemos mientras pueda salvar millones de vidas. Debemos usarlo con buen juicio para alargar su vida útil. En el caso de las plantas transgénicas, se sigue una estrategia de refugios no transgénicos que dificultan la aparición de resistencia y, por otra parte, es importante recordar que pueden ser un elemento más en la lucha integrada.

Los posibles daños que las plantas transgénicas resistentes a un determinado organismo puedan causar a otros organismos que entren en contacto con ellas han sido objeto de debate. En particular, ha dado mucho que hablar el caso concreto del maíz transgénico resistente al taladro europeo y los daños potenciales a la mariposa monarca. Si se fuerza a dicha mariposa a consumir dosis altas de polen de maíz transgénico su viabilidad es menor que si consume polen no transgénico. Sin embargo, la mariposa no consume maíz ni polen en condiciones de campo, ya que vive de una planta euforbiácea, y los daños cuando está próxima a los campos de maíz son mínimos. En contraste, el tratamiento con productos químicos desde una avioneta le afecta significativamente y, si se renuncia a tomar medidas protectoras, los taladros pueden destruir por completo la cosecha de maíz.

## **EVALUACIÓN DEL RIESGO**

### **El concepto de “equivalencia sustancial”**



El punto de partida para la evaluación de los posibles riesgos de una planta transgénica consiste en establecer por vía experimental si a ésta es equivalente sustancialmente a la no transgénica de la cual se derivó, si es equivalente excepto para unas características completas o si no es equivalente. En el primer caso hay que concluir que la transgénica no comporta riesgos adicionales con respecto a la no transgénica. En el segundo caso hay que evaluar los posibles riesgos derivados de la característica o las características diferenciales. En el caso de no equivalencia, el riesgo de la planta transgénica debe ser evaluado *ex novo*, sin apoyarse en la no transgénica como referencia.

Cuando se obtiene una planta transgénica, se pretende introducir en ella unos caracteres de interés o suprimir propiedades no deseables. Es natural que estos efectos pretendidos sean los primeros a investigar en el marco conceptual que acabamos de enunciar. Sin embargo, hay que tener en cuenta posibles efectos no pretendidos. Estos últimos pueden ser predecibles, ya que conocemos en que consiste la modificación esperada, o no ser predecibles debido a laguna interacción inesperada según nuestro conocimiento actual. Las modernas técnicas bioquímicas, tales como la cromatografía de alta resolución o la espectrografía de masas, permiten abordar la identificación de estos últimos.

En cualquier caso, hay que señalar que la aplicación de estos conceptos no tendría por qué estar restringida a las plantas transgénicas, ya que reflejan una problemática que sería aplicable a todas las modificaciones genéticas que se han introducido en los genomas vegetales en los últimos diez milenios.

### **La evaluación en la práctica**

Los distintos países y regiones han establecido normativas y procedimientos de aprobación que, aunque similares, reflejan diferentes marcos legales y tradiciones culturales: más pragmáticas las culturas anglosajonas que las mediterráneas y latinas. Así por ejemplo, en Estados Unidos se aplica la legislación vigente para nuevas variedades y nuevos productos fitosanitarios, junto con la referente a medio ambiente. Esto implica que tienen competencia la *Food and Drug Administration* (FDA), el *United States Department of Agriculture* (USDA) y la *Environmental Protection Agency* (EPA). Esta tendencia se da en los diferentes países, incluidas, como veremos más adelante, la Unión Europea y España.

Los dos primeros productos transgénicos comercializados que han llegado a Europa, un maíz resistente a un insecto y una soja resistente a un herbicida, han suscitado una encendida controversia. A título de ejemplo, describiremos los aspectos considerados en la aprobación del maíz transgénico.

El maíz comercializado es un híbrido de Ciba Seeds (Novartis) que expresa el gen de la proteína *Bt* de la bacteria *Bacillus thuringiensis*, gen que le confiere resistencia al "taladro europeo" (*Ostrinia nubilalis*), un insecto devastador que, como su nombre vulgar indica, taladra y destruye los tallos del maíz. Su desarrollo en el interior de la planta hace muy difícil su eliminación por tratamiento fitosanitario. Las pérdidas que causa son cuantiosas y los gastos y la contaminación derivados de su tratamiento químico son considerables.

La evaluación que se ha hecho de este maíz en relación con su seguridad para el hombre y con su comportamiento agronómico ha cubierto los siguientes aspectos:

- Análisis molecular y genético del maíz transgénico, que incluye de una descripción detallada de las construcciones génicas introducidas a la determinación del lugar de inserción del nuevo gen en el genoma y la comprobación de la estructura molecular exacta de la proteína bacteriana, tal como se expresa en la planta.
- Estudio cualitativo y cuantitativo de la distribución de la proteína foránea en las distintas partes del maíz transgénico.
- Comprobación de que los productos de los genes usados con carácter auxiliar en la obtención de la planta transgénica no se encuentran en cantidades detectables.
- Determinación de que los productos de los genes introducidos, con independencia de que se expresen o no, no son tóxicos para humanos y son degradables de forma rápida en su sistema digestivo.
- Demostración de que la composición de nutrientes del maíz transgénico no difiere de la del híbrido no transgénico del que se partió.
- Comprobación de que el comportamiento agronómico del maíz transgénico no difiere del no transgénico excepto en su resistencia al taladro.

La evaluación de los posibles riesgos para el medio ambiente ha comprendido las siguientes pruebas:

- Estudios de toxicología ambiental, los cuales han incluido la determinación de la toxicidad por vía oral en aves de la proteína bacteriana *Bt*, el ensayo de la toxicidad del polen transgénico para dáfidos, y de distintos tejidos del maíz transgénico para invertebrados del suelo, tales como las lombrices, y la comprobación de que la proteína *Bt* expresada es inocua para insectos que no sean plagas del maíz.

- Una justificación especial de que la planta transgénica de maíz es inocua para especies de insectos amenazadas de extinción.
- Comprobación de que no hay riesgos de la supervivencia del maíz transgénico por sí mismo o de la transferencia de sus genes a especies silvestres próximas o distantes.

La soja *Roundup Ready* de Monsanto, que posee un gen que le confiere resistencia a dicho herbicida, permite su cultivo con laboreo mínimo y un control de malas hierbas más fácil, barato y eficaz. La evaluación de esta soja ha seguido un proceso similar al descrito para el maíz y ha supuesto la realización de centenares de estudios.

En síntesis, a las plantas transgénicas se les están aplicando criterios de precaución que no cumplirían muchas plantas no transgénicas, ni los productos de la mal llamada agricultura biológica, ni muchos productos alimentarios habituales - como el azúcar, el té, el café, la pimienta, el perejil, o las setas llamadas comestibles - y, por supuesto, tampoco numerosos elementos de nuestra vida cotidiana, como el tabaco, el automóvil o el avión.

## LA BIOTECNOLOGÍA AGRÍCOLA EN ESPAÑA

### Las especies importantes

En la Tabla 6 se consigna la extensión de algunos de los cultivos principales, incluidos aquellos para los que se han solicitado autorización de variedad transgénica en la CEE. Todos los cultivos en los que se van producir innovaciones tienen cierta importancia en España, con excepción de la soja, que apenas se cultiva y, por otra parte, sólo para el olivo se carece por el momento de tecnología transgénica apropiada.

**Tabla 6.**

Superficies cultivadas (miles ha) de algunas especies vegetales

Cultivo	Secano	Regadío	Total
Trigo	1.898	229	2.126
Cebada	3.303	252	3.555
Arroz	-	54	54
Maíz	97	260	357

---

Patata	98	108	206
Remolacha	40	132	172
Algodón	-	31	31
Tomate	2,3	42+11(protegido)	55
Tabaco	-	18	18
Viñedo	1.125	73	1.198
Olivar	2.045	178	2.223
Colza	13	74	87
Soja	-	3	3

---

Las semillas y las plantas de vivero son suministradas en España por unas 350 empresas. El tamaño medio de estas empresas no ha cambiado desde 1985 y la industria sigue estando bastante atomizada. Además, el tamaño de las empresas es muy variable y la mayor parte de las más importantes pertenecen a organizaciones multinacionales.

## La investigación

Se solicitaron las primeras patentes a escala mundial sobre la obtención de plantas transgénicas en los días 13 y 17 de Enero de 1983. Las solicitudes fueron presentadas de forma independiente por investigadores de la Universidad de Gante, en Bélgica, y de la empresa Monsanto, en Estados Unidos. Así se inició un proceso que ha desembocado en la reciente comercialización de los primeros cultivos transgénicos. Unos meses antes de que fuera presentada la primera solicitud de patente sobre la transformación de plantas por ingeniería genética, en el verano de 1982, los rudimentos de dicha tecnología fueron transferidos desde el grupo de investigación que la desarrolló en la Universidad de Gante a un grupo de investigadores de la Universidad Politécnica de Madrid.

A partir de 1983, dicha tecnología se empezó a aplicar para los fines de la investigación básica en dos o tres grupos de investigación, principalmente en Madrid y Barcelona. En la actualidad existen unos 170 grupos de investigadores en todo el territorio español - distribuidos en unos 70 centros públicos de investigación y situados en 17 ciudades distintas - que declaran usar dicha tecnología en mayor o menor grado. Una buena parte de esa aplicación tiene fines básicos, de mero avance de nuestro conocimiento sobre las plantas cultivadas, pero otra parte nada desdeñable está dando lugar a aplicaciones agronómicas.

Los centros que en la actualidad albergan un mayor número de investigadores dedicados a la biotecnología vegetal son el Centro de Biología Molecular y Celular de Plantas, establecido en

Valencia de forma conjunta por la Universidad Politécnica y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), el Centro de Investigación y Desarrollo de Barcelona, dependiente del CSIC, el Departamento de Biotecnología de la Universidad Politécnica de Madrid, y la división de plantas del Centro Nacional de Biotecnología (CNB) en Madrid, también adscrito al CSIC.

En relación con este último centro, hay que señalar que entre las prioridades gubernamentales en materia de investigación hacia 1982, la Biotecnología ocupó un lugar preeminente y que la decisión de crear el CNB constituyó la primera expresión práctica de esa prioridad política. Sus excelentes instalaciones, que tardaron más media docena de años en completarse, son hoy plenamente funcionales.

Las aplicaciones más generalizadas de la biología molecular a la mejora de las plantas cultivadas en nuestro país tienen que ver con el uso de marcadores moleculares (RFLPs, RAPIDS, etc.) en la identificación de variedades y en la mejora genética de plantas. Adicionalmente, se han hecho contribuciones importantes en las áreas de la patología vegetal (interacción patógeno-planta) y del estrés abiótico, principalmente en relación con la tolerancia a la salinidad.

Algunas de estas aplicaciones han dado lugar a un número reducido de patentes de ámbito internacional, incluida su aprobación en los Estados Unidos de Norteamérica, la primera de las cuales fue solicitada en 1991. Debido a la estructura de la industria de semillas en España, las innovaciones tecnológicas y los correspondientes derechos de uso (licencia de uso, exclusiva o no) han sido generalmente vendidos a compañías internacionales.

Todo este desarrollo de la ingeniería genética vegetal ha sido encuadrado a partir de 1988 en los sucesivos Planes Nacionales de Investigación: 1988-1991, 1992-1995, y 1996-1999, diseñados bajo el marco legal de la Ley de la Ciencia de 1986. Una fracción importante de los fondos económicos destinados a dicho plan ha sido dedicada a la Biotecnología Vegetal, tanto en el ámbito del programa de biotecnología como dentro de los de agricultura y de medio ambiente.

## **Ensayos de campo**

Los ensayos con plantas transgénicas en España se iniciaron en 1993, año en que se realizaron 3 ensayos. Cada uno de estos ensayos suele incluir un número variable de parcelas en una localidad o región. En los 997 y 1998, se realizaron 44 y 42 ensayos, respectivamente,

y hasta el presente se han completado un total de 128 ensayos en todas las provincias del territorio español, con excepción de Baleares y Cantabria. Andalucía, con 67 ensayos, ha sido la región española en la que más se ha experimentado con plantas transgénicas.

Los ensayos realizados con cada una de las especies se consignan en la Tabla 7. Los tipos de modificación genética de las plantas ensayadas incluyen de forma prominente los que afectan a la obtención de híbridos (androesterilidad), la tolerancia a herbicidas y la resistencia a insectos, así como a otras posibles aplicaciones (Tabla 8).

**Tabla 7.**

Número de ensayos por especie

<i>Especie/Número</i>					
Tomate	14	Colza	2	Maíz	27
Remolacha	11	Tabaco	5	Algodón	7
Melón	6	Patata	3	Calabacín	2
Soja	2	Eucaliptus	1	Alfalfa	1
Girasol	1	Trigo	2	Naranja	1
Ciruelo	1	Fresa	2	Rhizobium*	3

\**Bacteria simbiótica*

**Tabla 8.**

Tipos de modificaciones genéticas de las plantas ensayadas

Tipo de modificación/Número de ensayos			
Tolerancia a sequía	1	Terapia génica	1
Expresión génica	10	Mod. características biol.	22
Androesterilidad/Tol. herbicida	3	Res. Insectos/Tol. herbicida	6
Resistencia a virus	13	Resistencia a insectos	26
Tolerancia a herbicida	32	Androesterilidad	3

Con objeto de apoyar y asesorar a las autoridades competentes, sean centrales o autonómicas, se ha creado la Comisión Nacional de Bioseguridad. Entre sus funciones se encuentran el estudio y la evaluación de los dossiers con los que se informa a la autoridad competente respecto a la comercialización de productos que se basen en OGMs o que los contengan.

Desde el punto de vista ético, las plantas transgénicas no suscitan controversia alguna en la sociedad española, en contraste con otras aplicaciones de la ingeniería genética a la reproducción humana o a los animales domésticos. Como hemos discutido anteriormente, las preocupaciones sociales tienen que ver más bien con los posibles problemas de seguridad en relación con la salud humana y con el medio ambiente. El público español desconoce con frecuencia la existencia de mecanismos institucionales que actúen de garantes de esta seguridad y desconfían de que las administraciones estén protegiendo efectivamente los intereses de los consumidores a este respecto.

Resulta palpable que las administraciones deben realizar (están realizando) un esfuerzo de comunicación con los administrados para dar a conocer los mecanismos de control. Los garantes de la biotecnología vegetal son órganos y comisiones que actúan principalmente bajo la tutela de los ministerios de Medio Ambiente y de Agricultura, Pesca y Alimentación:

Como resumen, puede decirse que los mecanismos de garantía respecto a las innovaciones de la biotecnología en el aspecto agronómico-vegetal están organizados y en periodo de prudente rodaje

### **Cultivos autorizados**

Hasta el momento sólo están autorizadas para su cultivo en España las dos primeras variedades de maíz resistente al taladro mediante la expresión de la proteína Bt de *Bacillus thuringiensis*, 950242 COMPA CB y 950243 JORDI CB. que ha sido comercializada por Novartis Seeds, S.A. Un total de unas 20.000 ha han sido sembradas con las nuevas semillas. Las pérdidas anuales debidas al taladro del maíz en España han sido en el pasado del orden del 5%-20% de la cosecha, lo que representa entre 4.000 y 17.000 millones de pesetas por año.

Adicionalmente, han cubierto los trámites de inscripción tres variedades para las que España actúa como ponente ante la CEE en el trámite de aprobación comunitaria. Dichas variedades son las siguientes: una variedad de tomate con la maduración retrasada de la empresa Zeneca

y dos variedades de algodón de la empresa Monsanto, una resistente a lepidópteros y otra tolerante a glifosato.

### **Aceptación de los cultivos transgénicos**

Puede decirse que si examinamos las posturas públicas de las distintas instituciones y entidades relacionadas con el tema de la biotecnología para la agricultura, se encuentra toda la gama de posiciones que se han dado en otros países europeos, aunque en algunos casos, como el del movimiento ecologista, la reacción se haya dado más tarde.

La administración central del estado parece inclinarse a seguir las tendencias predominantes en la CEE y a adoptarlas a escala nacional con una cierta cautela.

El movimiento ecologista, con algunos matices, se opone frontalmente a la nueva tecnología tanto en el plano estrictamente técnico (seguridad sanitaria, medio ambiente, etc.) como en el político-económico (concentración del poder en compañías multinacionales) y en el ideológico.

Entre las organizaciones de agricultores, las hay que han adoptado en esencia el mismo ideario que el ecologismo radical; otras parecen estar a la expectativa, después de una oposición inicial, en fin, otras han adoptado una postura consistente en recabar información sobre la tecnología, mediante talleres y seminarios, con objeto de incorporarla si le supone ventajas concretas.

Las asociaciones de consumidores ponen el acento en los aspectos de seguridad para la salud humana, e insisten generalmente en que las normas de etiquetado sean aplicadas de forma rigurosa. El estamento científico, en general, y la Sociedad Española de Biotecnología, en particular, han adoptado posturas de claro apoyo a la introducción de la nueva tecnología. Esta última sociedad, que representa a los investigadores de la especialidad, viene realizando una activa campaña de información al público. Entre los científicos es frecuente ver con recelo la concentración del comercio de las semillas en unas pocas empresas multinacionales, si bien dicha objeción no se restringe a este sector industrial.

Se ha realizado un cierto número de encuestas entre agricultores con objeto de averiguar su actitud frente a los cultivos transgénicos y tiende a predominar el desconocimiento completo respecto a dichos cultivos. Resumiremos a continuación algunos de los resultados más relevantes.

Una encuesta completada en Junio de 1997, entre 600 agricultores de cinco regiones españolas representativos del cultivo del maíz, mostró que sólo un 39% de los encuestados



había oído hablar del maíz autoprotegido contra el taladro. Entre éstos, el 76% tenían una opinión favorable respecto a dicho maíz en términos de mejor producción y comodidad de manejo, así como de mayor beneficio para el medio ambiente, un 5% tenían una opinión desfavorable ante el temor de tener problemas para vender la cosecha, y el restante 19% se mostraba indiferente. Por otra parte, el 92% creía que Europa no debe mantenerse al margen de estas nuevas tecnologías.

En una encuesta más reciente - realizada sobre el algodón resistente a lepidópteros a 100 agricultores en las provincias andaluzas de Cádiz, Córdoba y Sevilla en octubre de 1988 - el 61% de los encuestados afirmaron conocer las nuevas variedades. Un 97% de estos últimos estimó que las nuevas variedades podían ser muy útiles, y se mostraron dispuestos a utilizarlas al precio apropiado (40%, claramente sí; 56%, probablemente sí).

**Tabla 9.**

Encuesta sobre los posibles beneficios de la remolacha resistente a glifosato

<i>Beneficio</i>	<i>Si</i>	<i>No</i>	<i>indiferente</i>
	%	%	%
Económico	79,7	2,1	17,2
Medio-ambiental	43	3,2	53,8
Facilidad control malas hierbas	92,5	0	7,5

---

En relación con el cultivo de la remolacha resistente a glifosato se ha realizado una encuesta a agricultores que previamente habían visitado los campos de ensayo y habían recibido una explicación sobre plantas transgénicas durante la visita. Como en los casos anteriores, sólo un 70% de los encuestados tenían conocimiento previo sobre el tema. Sin embargo, tal como se refleja en la Tabla 9, sus opiniones respecto al innovación fueron aún más favorables que en las encuestas arriba reseñadas.

En relación con los consumidores, puede citarse una encuesta realizada en 1992 por el Ministerio de Obras Públicas, responsable entonces del medio ambiente.

**Tabla 10.**

Encuesta a los consumidores sobre plantas transgénicas resistentes a insectos

Pregunta	Si	No	Indiferente/no sabe
	%	%	%
¿Ha hablado con alguien sobre Biotecnología?	33	67	0
¿Son útiles a la sociedad las plantas resistentes a insectos?	65	20	15
¿Comportan riesgos?	43	35	22
¿Son aceptables moralmente?	59	23	18
¿Deben ser fomentadas?	56	24	20

---

Casi un 70% de los encuestados se mostraron favorables a los posibles beneficios de las plantas transgénicas tolerantes a herbicidas, aunque entonces el nivel de información del público español sobre las nuevas tecnologías era bastante escaso.

En la Tabla 10 se muestran datos referentes a las opiniones de los consumidores españoles sobre plantas transgénicas resistentes a insectos.

Dichos datos han sido extraídos de una encuesta difundida por el Ministerio de Medio Ambiente e indican una actitud moderadamente favorable.

## **EL FUTURO GLOBAL Y EL EUROPEO**

Producir una tonelada de alimento con una variedad moderna de maíz o de trigo requiere menos energía, menos suelo laborable, y menos productos fitosanitarios y fertilizantes que con una de las que se cultivaban hace treinta años. Sin embargo, en ese periodo el número de toneladas de alimento que deben producirse se ha más que duplicado para alimentar a una población que ha pasado de 3.000 millones a 6.000 millones de personas. Esto ha hecho que, a pesar de los perfeccionamientos conseguidos, el impacto de la actividad agrícola sobre el medio ambiente se haya agravado.

Si extrapolamos los rendimientos agrícolas al año 2025, basándonos en las tasas de mejora obtenidas en los últimos años, y los confrontamos con la demanda prevista para dicha fecha, según el crecimiento de la población y el de la demanda per cápita, nos encontramos con grandes déficits en casi todas las regiones del mundo (Tabla 11). Esto significa que necesitamos un mayor ritmo de innovación para resolver este conflicto potencial.

Muchos agrónomos y biólogos opinamos que no es seguro que en el futuro se vaya a poder estar a la altura de los retos planteados por las necesidades de alimentos. No creen lo mismo la mayoría de los ecologistas y muchos economistas liberales. Según los primeros, no sólo se produce ya suficiente para alimentar a la población del año 2025 sino que además se debe volver a un sistema de producción – el de la agricultura llamada biológica – cuyos rendimientos son la mitad de los de la agricultura intensiva moderna. Para algunos economistas, la necesidad es la madre del ingenio y basta su aparición para que inexorablemente surja la respuesta productiva adecuada.

**Tabla 11.**

Déficit proyectado de la disponibilidad de cereales en el año 2025

Concepto	Magnitud
Area cosechada en 1989-91	703 millones de hectáreas
Rendimiento medio en 1989-91	2.711 kg/ha
Incremento anual de rendimiento en 1981-1997	39 kg/ha
Proyección del rendimiento al año 2025	4.076 kg/ha
Producción proyectada para el año 2025 (misma superficie)	2.977 millones de toneladas
Déficit en el África sub-sahariana en 2025	89 millones de toneladas
Déficit en Asia en le año 2025 (excluido Oriente próximo)	152 millones de toneladas
Déficit en el Oriente próximo en 2025	133 millones de toneladas
Déficit en América latina en 2025	47 millones de toneladas
Superávit en países desarrollados en 2025	351 millones de toneladas
Déficit Mundial en el año 2025	68 millones de toneladas

\* Adaptado de T. Dyson *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96: 5929-5936 (1999)

Se dice con mucha frivolidad que la solución del problema del hambre en el mundo carece de una componente tecnológica, ya que se trata de un mero problema de reparto. Los que eso dicen ignoran que, aunque en efecto el hambre no es sólo un problema técnico, sí que tiene una componente técnica esencial. Así, en muchas regiones del mundo coexiste el hambre con los excedentes alimentarios. Es su precio la barrera que separa al alimento del hambriento. Los avances tecnológicos y los incrementos de producción de estas últimas décadas han abaratado los alimentos a un cuarto del precio que tenían (en divisas constantes) al principio

del periodo. Si esto no hubiera ocurrido, no cabe duda que el número de los que sufren hambre extrema sería varias veces superior al actual.

Como hemos indicado, la obtención de plantas transgénicas es una tecnología que ha madurado a lo largo de los últimos veinte años. La superficie sembrada con semillas transgénicas ha pasado de poco más de 1 millón de hectáreas en 1996 a 40 millones de hectáreas en 1999 (Tabla 12). A corto plazo, el futuro aumento va a depender de la opinión pública en Europa, volátil y erróneamente informada. A medio y largo plazo, no debe haber duda que la nueva tecnología acabará consolidándose. La mejora genética vegetal – la mendeliana junto a la molecular - es una de las herramientas más poderosas que pueden ayudarnos a aumentar los rendimientos de la actividad agrícola y a hacer ésta más compatible con el medio ambiente.

**Tabla 12.**  
 Superficie mundial con cultivos transgénicos

	Millones de hectáreas	
	1998	1999
<b>Cosecha</b>		
Soja	14,5	21,6
Maíz	8,3	11,1
Algodón	2,5	3,7
Colza	2,4	3,4
Patata	<0,1	<0,1
Calabaza	0,0	<0,1
Papaya	0,0	<0,1
<b>Carácter</b>		
Tolerancia a herbicida	19,8	28,1
Resistencia a insectos (Bt)	7,7	8,9
Combinación de las anteriores	0,3	2,9
Resistencia a virus/otras aplicaciones	<0,1	<0,1

Desde el punto de vista de los países menos favorecidos, el peligro no es que se aplique la nueva tecnología sino que no se aplique. En efecto, la revolución verde liderada por Norman Borlaug estuvo dirigida a dichos países y el 80%-90% de los trigos producidos actualmente en ellos se debe a esta iniciativa. Sin embargo, la nueva revolución está enfocada principalmente al mundo desarrollado, aunque países tales como China, India o Brasil hayan entrado de lleno

en la nueva tecnología. Los peligros que merecen discutirse son el posible monopolio de la tecnología por muy pocas manos y la falta de mecanismos para abordar problemas que puedan ser específicos de los países más necesitados.

## **BIBLIOGRAFÍA**

*La Tercera Revolución Verde*. F. García Olmedo, 1998. Editorial Debate, Madrid, Es. (trad. italiana, Il Sole/24Hore, 2000).

*Mejora Genética Vegetal*. F. García Olmedo, en "La ciencia al alcance de la mano, Ciencia para todos P. García-Barreno (ed.). Sociedad Estatal España-Nuevo Milenio 2000.

*La biotechnologie per l'agricoltura in Spagna*. F. García Olmedo en "VII Rapporto Nomisma sull'agricoltura italiana. Il Sole/24 Hore, 1999.

*La biotecnología agrícola en España*. F, García Olmedo. CEFI (en prensa)

*Todo lo que nunca deseó estudiar sobre biotecnología molecular y que tampoco quiso preguntar*. F. García Olmedo 2000. Revista de Libros 43-44: 28-31

*Plant Breeding. Principles and Prospects*. M. D. Hayward, N. O. Bosemark and I. Romagosa (eds.), 1993. Capman & Hall, London, GB.

*Introducción a la Mejora Genética Vegetal*. J. I. Cubero, 1999. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, Es.

*Molecular Biotechnology (2<sup>nd</sup> edition)*. B. R. Glick and J. J. Pasternak, 1998. ASM Press, Wahington D.C., USA.

*Ingeniería Genética y Transferencia Génica*. M. Izquierdo Rojo, 1999. Ediciones Pirámide, Madrid, Es.