



LOS OGM ANTE EL RETO AGROALIMENTARIO

Francisco García Olmedo

Real Academia de Ingeniería

1. Introducción

1.1. Propósito

Nos proponemos sintetizar y actualizar el debatido tema del papel que puede desempeñar la moderna biotecnología en relación con la producción de alimentos y, en especial, con la resolución del problema del hambre, un asunto sobre el que hemos tenido que incidir reiteradamente a lo largo de la última década¹. Consignaremos nuestros principales argumentos sobre la cuestión, no sin antes abordar algunas cuestiones terminológicas y técnicas con objeto de que los lectores puedan acercarse al problema planteado.

1.2. Los OGM

Términos tales como organismos genéticamente modificados (OGM), alimentos transgénicos, ingeniería genética, ADN recombinante, transferencia génica, clonación, alimentos naturales, mejora genética e, incluso, biotecnología han invadido nuestro lenguaje cotidiano sin orden ni concierto. A estas alturas empieza a ser difícil normalizar la situación, pero no se debe renunciar a ello.

RESUMEN

Se plantea la relación entre los avances biotecnológicos y los retos agroalimentarios, especialmente el del hambre en el mundo. Se empieza por clarificar los principales problemas de terminología y se hace una introducción sucinta a los fundamentos de la nueva biotecnología. Se dan datos de cómo, a pesar del escepticismo europeo, las primeras aplicaciones se han difundido globalmente hasta ocupar más de 110 millones de hectáreas. Los países en vías de desarrollo representan ya el 40% de la superficie sembrada con cosechas transgénicas y más del 90% de las explotaciones que las utilizan a escala global, por lo que no puede negarse que dichas cosechas están ya contribuyendo a nutrir a los más necesitados.

ABSTRACT

The impact of biotechnological advances on food production challenges is analyzed, especially in connection with world hunger. Terminology and basic technology are discussed. In spite of European scepticism, the first transgenic crops already cover over 110 million hectares. Over 40% of that figure corresponds to developing countries, where over 90% of transgenic farmers are also located, which implies that the new technology is already contributing to solve the problem of world hunger.

¹ García Olmedo (1998); García Olmedo, Sanz Magallón y Martín Palma (2001); García Olmedo, Puigdomenech y Beltrán (2003); García Olmedo y Carbonero (2003) y García Olmedo (en prensa).

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 fabricación de cerveza en Mesopotamia, 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, que es aquélla que implica el manejo de las células y organismos a través de su material genético, el ADN, en el tubo de ensayo.

La práctica totalidad de lo que ponemos en nuestra mesa 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. Lo importante es la naturaleza de los cambios introducidos y no los métodos empleados para ello. De hecho, la ingeniería genética es sólo uno de esos métodos –una modalidad más de mejora genética– y sólo sirve para modificar uno o pocos genes de forma muy selectiva. En consecuencia, resulta absurdo denominar OGM sólo a los productos de la ingeniería genética para contraponerlos a los supuestamente «naturales».

Casi nada de lo que ponemos en nuestra mesa es natural, hasta el punto que la mayoría de los organismos de los que derivamos nuestro alimento han perdido su capacidad de sobrevivir por sí mismos en la naturaleza. Es más, para llegar a nuestra mesa han debido sufrir alteraciones genéticas que les priven de infinidad de 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.

Se consideran 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.



1.3. Una nueva tecnología²

En lo que difieren la vieja y la nueva tecnología es en el repertorio genético 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 porque, parafraseando el conocido refrán, «degradado es todo gen que entra por boca de cristiano». 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.

Lo que llama más la atención a los que no son especialistas es que se pueda extraer el ADN de cualquier organismo, aislar de él genes concretos, modificar y recombinar éstos en el tubo de ensayo y devolverlos al mismo organismo o a otro distinto del de partida. Al experto no le sorprende esto, porque sabe desde hace muchas décadas que los genes no son más que moléculas.

2. Nociones preliminares

2.1. Clonación y expresión génica

Se clona una molécula de ADN, una célula o un organismo si se multiplican de forma idéntica por cualquier procedimiento. La clonación, por tanto, no implica introducir alteración genética alguna, aunque lo previamente alterado pueda ser clonado y lo clonado pueda ser expresado transgénicamente. Para clonar un gen, un tramo de ADN, una vez aislado, disponemos de métodos abióticos y bióticos. Un cierto tipo de enzima permite producir miles de copias de una pieza de ADN mediante un ingenioso dispositivo de multiplicación en cadena; una especie de «clonación química» en el tubo de ensayo (técnica de la polimerasa en cadena). Alternativamente, podemos introducir el gen en una célula –sea de la bacteria *Echerichia coli*, de la levadura de panadería o de cualquier otro organismo– para obtener copias de él cuando se multiplique la célula en cuestión. En el centro de todas estas tecnologías está el gen como entidad física, y es imprescindible hacer una breve digresión sobre dicha entidad si queremos entenderlas.

² Un tratamiento sistemático de la nueva tecnología puede encontrarse en García Olmedo (1998) y en Glick y Pasternak (2000).

El orden de las bases que, como eslabones, se engarzan para formar un gen confiere a éste su singularidad. En los cientos de bases que constituyen un gen está escrita –con sólo 4 letras, las mencionadas A, T, G, C– una pieza de información compleja. De izquierda a derecha, el gen comprende primero un tramo, llamado promotor, en el que está codificada la información relativa a su programa de expresión. Combinaciones de secuencias cortas dentro del promotor determinan en qué momento del desarrollo o de la vida del organismo y en qué tipos de células ha de expresarse el gen, así como a la intensidad de dicha expresión. Al promotor le sigue la llamada región codificante, que contiene la información constructiva, los «planos» del producto génico, de la proteína. Cuando hablamos de la intensidad de la expresión génica, nos referimos al número de copias de la proteína codificada que ha de fabricarse por cada célula.

Las proteínas son también macromoléculas formadas por el encadenamiento de elementos estructurales: los 20 aminoácidos distintos que las componen. A cada gen, a cada secuencia de bases en su parte codificante, le corresponde una proteína, una secuencia de aminoácidos. El conocimiento de la clave genética nos permite traducir el lenguaje en 4 signos del ácido nucleico al de 20 signos de las proteínas: cada secuencia de tres bases (tripleta) en el ADN determina un aminoácido en la proteína. Como el número de tripletas posibles a partir de cuatro signos es de 64, más de una tripleta distinta determina un aminoácido dado. El lenguaje del ADN es redundante.

Dos funciones, pues, tiene el gen: la informática, que reside en el promotor, y la arquitectónica, representada por la región codificante. La ingeniería genética puede operar en el tubo de ensayo sobre ambas regiones. Un gen aislado no tiene atributo alguno que de forma obvia lo identifique como procedente del elefante o del geranio; representa tan sólo la información correspondiente a una pieza entre las decenas de miles que componen un organismo.

La capacidad de extraer, estudiar y modificar cada una de las piezas que componen un ser vivo ha sido la llave de un avance revolucionario del conocimiento biológico, una poderosa herramienta para averiguar los secretos de la maquinaria vital. Las aplicaciones derivadas de este avance, que han seguido a los descubrimientos básicos sin solución de continuidad, se conocen con el nombre genérico de biotecnología molecular. Tratemos de animarle mediante una breve síntesis a modo de introducción.

2.2. Operaciones básicas

De un modo elemental podemos decir que las operaciones básicas de la ingeniería genética consisten en cortar de forma reproducible la doble cadena de ADN y en soldar o unir tramos de ADN en el orden requerido. Las herramientas que permiten hacer estas operaciones son enzimas (proteínas) con las propiedades catalíticas (facilitadoras) apropiadas, las cuales se aíslan de los



organismos más diversos. Son centenares las herramientas enzimáticas distintas que se pueden encontrar en los catálogos comerciales para realizar todo el variado repertorio de alteraciones a que podemos someter al ADN *in vitro*.

La caracterización de un gen aislado incluye la determinación de su secuencia de bases, la lectura de la información genética que contiene plasmada en una sucesión determinada las letras (las bases) A, T, G, C. Y una de las alteraciones funcionales más simples que pueden introducirse consiste en cambiar el promotor original de dicho gen por el de otro, creando así un gen quimérico, lo que supone una programación distinta para la síntesis de la proteína codificada y determina que ésta se acumule en tejidos distintos de los originales cuando el gen es devuelto a un ser vivo.

La introducción de un gen aislado en una célula viva –proceso al que hemos denominado «transformación»– plantea al menos tres problemas: el de su acceso al interior de la célula; el de su replicación (copiado) para transferirse a las células descendientes de la transformada; y el de su expresión (funcionamiento) en la propia célula transformada y en sus descendientes. Cuando sólo se quiere multiplicar el ADN, no es necesario que el gen se exprese. Para cumplir estos requisitos, se recurre a un vector o vehículo de transformación, que no es más que una pieza adicional de ADN, con las características apropiadas, a la que se une el gen de interés.

El diseño de vectores es muy variado, según las células a transformar y los fines de la transformación. Sin embargo, todos los vectores tienden a imitar los modos cómo se resuelven esos mismos problemas en la naturaleza. El ADN desnudo es susceptible de ser incorporado (engullido) desde el exterior por distintos tipos de células, aunque con baja eficiencia. Cuando se requiere una mayor eficiencia, puede recurrirse a incluir el ADN en el interior de una partícula de virus o, como en el caso de la transformación de plantas, en un tipo de bacteria que es capaz de transferir una parte de su ADN a una célula vegetal. Los métodos más exóticos de transformación incluyen la microinyección de células embrionarias, en el caso de los animales, y el microbombardeo con la llamada «pistola génica», que se aplica en plantas. En este último caso, se revisten unos proyectiles microscópicos, de oro o de wolframio, con el ADN que se desea introducir y se disparan mediante un ingenioso mecanismo, lo que les permite atravesar la pared de la célula sin causar la muerte.

Una vez dentro de la célula blanco, el gen foráneo puede integrarse o no en un cromosoma de ésta. Si lo hace, se replicará al tiempo que el genoma del que ha entrado a formar parte. Si no lo hace, se replicará de forma independiente, provisto que el ADN que le sirve de vehículo contenga las señales apropiadas para ser reconocido por la maquinaria de replicación de la célula hospedadora. El gen introducido dará lugar a la síntesis de la proteína correspondiente si su promotor es apropiado para dicha célula.

3. Abanico de aplicaciones

3.1. Factorías unicelulares

Ilustraremos el potencial de la nueva tecnología con ejemplos concretos de aplicación. Las plantas y animales transgénicos han capturado desde el principio la imaginación pública. Sin embargo, los primeros productos de la ingeniería genética que han aparecido en nuestra vida cotidiana han sido generados por células en cultivo: células sin membrana nuclear (procarióticas), como es el caso de la bacteria *Escherichia coli*, y células con núcleo de organismos unicelulares, como la levadura de panadería, o aisladas de organismos superiores.

Como se ha indicado, los genes codifican proteínas, que son macromoléculas capaces de desempeñar muy variadas funciones biológicas, al actuar como enzimas (catalizadores biológicos), hormonas, anticuerpos, etc. El objetivo biotecnológico más sencillo consiste en producir grandes cantidades de una proteína mediante el cultivo de las células apropiadas. Éste es el caso de muchas proteínas de interés farmacológico, tales como la insulina, la hormona del crecimiento o el interferón, o de interés industrial, tales como las enzimas llamadas proteasas, que se usan en los detergentes, o las llamadas amilasas empleadas en panificación.

Los microorganismos se han usado empíricamente en procesos biotecnológicos tradicionales entre los que son bien conocidos la obtención de yogurt (producción de ácido láctico) o la de vino y cerveza (producción de alcohol). Por ingeniería genética se pueden modificar los microorganismos para que actúen como agentes en la producción de muy diversas moléculas de interés práctico. Citemos en este contexto la posible fabricación de vitaminas (p. ej.: vitamina C), de nuevos antibióticos y de tintes tradicionales, como el índigo, cuya obtención a partir de la planta del índigo es prohibitiva por lo costosa.

Otra vertiente importante del uso de los microorganismos alterados por ingeniería genética como agentes biológicos tiene que ver con los procesos de biodegradación. En unos casos, se trata de sustratos de difícil transformación que en potencia podrían rendir compuestos útiles. Así, a partir de polisacáridos como la lignocelulosa se pueden producir azúcares e incluso alcohol. En otros casos, el problema que se resuelve es el de la contaminación del medio ambiente por sustancias que hasta ahora no eran biodegradables.

3.2. Animales

En lo que se refiere a los animales transgénicos, la mayor parte de la investigación se ha centrado en el ratón y, una vez resueltos los aspectos metodológicos, se han desarrollado estrategias similares para la transformación de vacas, ovejas, cabras, cerdos, pájaros y peces. Aunque se espera poder mejorar las propiedades productivas tradicionales de los animales domésti-



cos en un futuro próximo, como por ejemplo, hacerles resistentes a ciertas enfermedades, las primeras aplicaciones prácticas que se han intentado introducir han encontrado dificultades técnicas y de aceptación. Sin embargo, progresa rápidamente la explotación del enorme potencial de la ingeniería genética para alterar la capacidad sintética de la glándula mamaria de especies tales como la vaca, la oveja o la cabra. Dicha glándula es una auténtica fábrica de proteínas. En el caso de la vaca, es capaz de producir unos 350 kilos de proteína al año, por lo que basta que una mínima parte de esa proteína sea producto del trans-gen apropiado para que media docena de vacas transgénicas sean capaces de abastecer el mercado mundial de una proteína de interés farmacológico y alto valor añadido. En tiempos recientes se han iniciado los primeros trámites para el largo proceso que, de completarse con éxito, permitiría la autorización de animales transgénicos para consumo humano directo.

3.3. Plantas

En lo que se refiere a las plantas, 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. 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.

4. Objetivos de la biotecnología vegetal

4.1. Rendimiento y compatibilidad ambiental

En la Tabla 1 se consignan los objetivos relacionados con la obtención de variedades de mayor rendimiento y más compatibles con el medio ambiente. Así por ejemplo, una 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 impliquen 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 de insectos. Esta propiedad, su especificidad, ha hecho que la bacteria liofilizada (desechada) se

Tabla 1.
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 partenocárpico (sin semillas)
Resistencia a plagas y enfermedades	Resistencia a insectos (proteína Bt)
Resistencia a herbicidas	Resistencia a glifosato (<i>round up</i>) Resistencia a fosfinotrician (<i>basta</i>)
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



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.

4.2. Otros objetivos tradicionales

La mejora genética tradicional ha venido persiguiendo también 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 2).

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.

Tabla 2.
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 alérgenos 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.

4.3. Nuevos objetivos

Las plantas pueden alterarse por ingeniería genética con fines distintos de los tradicionales. En este sentido cabe señalar su posible uso como bio-reactores y como agentes para la descontaminación (Tabla 3).

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.

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; PHA), 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 PHA 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 PHA a las propias fibras celulósicas, dando lugar una fibra textil con nuevas propiedades.

Tabla 3.
Nuevos objetivos de la ingeniería genética vegetal

Tipo de objetivo	Ejemplos
Las plantas como bioreactores	
1) Productos de alto consumo	Producción de plásticos biodegradables Producción de aceites industriales
2) 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



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 plantas transgénicas que transforman el ión mercúrico y que podrían recuperar suelos contaminados por dicho metal, y plantas que son capaces de degradar compuestos orgánicos, tales como nitroglicerina o cloroformo.

5. Agricultura y contaminación

El concepto de contaminación incide en la ciencia agronómica en al menos tres contextos: a) el de la contaminación producida por la propia práctica agrícola; b) el de las limitaciones que la contaminación de suelos y aguas impone a los cultivos; c) el de la posibilidad de cultivar plantas apropiadas como agentes descontaminantes. La ingeniería genética vegetal constituye una herramienta de gran versatilidad y potencial en la resolución de problemas concretos que se enmarcan en los tres ámbitos esbozados: en la gestión de contaminantes agrícolas, en la superación de las limitaciones impuestas al cultivo por la contaminación y en el remedio de ésta.

Es importante señalar que toda mejora del rendimiento disminuye potencialmente la contaminación, ya que la forma correcta de contabilizar ésta es por tonelada de alimento producido, por lo que una reducción del suelo necesario para producir una tonelada disminuye el impacto ambiental de la actividad agrícola, al disminuir la contaminación 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.

6. Bioseguridad

6.1. Seguridad para el ser humano

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.

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 pue-



den 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.

6.2. Seguridad genética

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 desdéniable 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.



6.3. Seguridad medio-ambiental

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.

7. Los cultivos transgénicos a escala global³

El uso práctico de variedades transgénicas se inició en 1996, y en 2007 se sembraron más de 110 millones de hectáreas en 23 países. A partir del año 2000, el aumento de superficie sembrada ha sido mayor en los países en desarrollo que en los desarrollados. Entre 2006 y 2007, la superficie sembrada creció en 12,3 millones de hectáreas, lo que

³ Ver James (2007).

supone una tasa de aumento del 12%. EEUU (50,6%), Argentina (16,8%), Brasil (13,1%), Canadá (6,1%) e India (5,4%) son los principales países productores. La superficie sembrada en España con maíz transgénico resistente al taladro europeo representa menos del 0,1 % del mundial (75.000 ha).

Por cultivos, la mayor parte de la superficie sembrada, el 57%, corresponde a la soja, y le siguen el maíz (25%), el algodón (13%), la colza (5%) y la alfalfa (0,1%), con áreas mucho menores ocupadas por la papaya y el zapallo resistentes a virus, el álamo resistente a insectos y el clavel azul. Las características más difundidas son la tolerancia a herbicidas (TH, 63 %), incorporada a soja, maíz, algodón y alfalfa, la resistencia a insectos (Bt, 18%), incorporada a maíz y algodón, y la doble incorporación TH/Bt a maíz y algodón.

Los productos biotecnológicos aumentaron los beneficios globales en EEUU por valor de 12.600 millones de dólares entre 1996 y 2005. A lo largo de la década, las nuevas semillas han aumentado consistentemente el rendimiento y han reducido sin excepción los costes de los tratamientos químicos. Los costes adicionales de la semilla se han mantenido por debajo del aumento de los ingresos debido al incremento de productividad. La reducción global de costes referida a las toneladas producidas han sido, como media, del 20% para la soja, el 25% para el algodón y el 13% para el maíz. En el mismo periodo de tiempo, la producción combinada de soja transgénica de Argentina y Brasil ha superado a la de EEUU, rompiendo así un virtual monopolio ejercido durante décadas.

8. Los OGM y el hambre

Ante las cifras que acabamos de consignar, no cabe sino concluir que esta tecnología se ha implantado de forma irreversible y que desempeña y desempeñará un papel clave en la respuesta a los retos alimentarios que tenemos ante nosotros. Europa viene tratando de excluirse de este avance técnico por razones ideológicas que, aplicadas con el mismo rigor a otras innovaciones, como por ejemplo las biomédicas, las electrónicas y las informáticas, nos dejarían relegados con respecto al resto del mundo. Por el contrario, los países en vías de desarrollo representan ya el 40% de la superficie sembrada con cosechas transgénicas y más del 90% de las explotaciones que las utilizan a escala global, por lo que no puede negarse que dichas cosechas están ya contribuyendo a nutrir a los más necesitados.

El hambre que padecen en torno a 800 millones de seres humanos sigue siendo una de las mayores lacras de la humanidad, pero no ha aumentado sino que ha disminuido: moderadamente en términos absolutos (en unos 200 millones desde 1970) y significativamente en términos relativos, ya que en los últimos 30 años la población mundial se ha duplicado. No es cierto que haya 3.000 millones de hambrientos y que su número esté en rápido aumento. En este asunto, como en otros, hay que constatar que, salvo el reciente repunte adverso, la humanidad está *mucho mejor* que antes, pero que no está *bien*, y puede ir a mucho peor.

En contra de las predicciones comúnmente aceptadas a mediados del siglo XX, la disponibilidad de alimentos *per cápita* ha aumentado en todas las regiones del mundo, excepto en el África sub-sahariana y, salvo el reciente incremento, el precio del alimento básico se ha reducido a la tercera parte en ese periodo (se ha dividido por 12 desde el siglo XVIII). Hasta los más realistas piensan que, en las próximas décadas, el hambre en el mundo está en trance de casi desaparecer en la mayor parte de las regiones, mientras que en África parece que el número de hambrientos puede llegar a duplicarse. Diluir nuestra atención con falsos fantasmas conduce de hecho a ignorar una realidad concreta y aterradora, e interfiere gravemente con la búsqueda de soluciones.

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 déficit en casi todas las regiones del mundo (Tabla 4). 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 rendimien-

Tabla 4.
Déficit proyectado de la disponibilidad de cereales en el año 2025

Concepto	Magnitud
Área 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

tos son muy inferiores a los de la moderna agricultura intensiva de conservación. Para algunos economistas, la necesidad es la madre del ingenio y basta su aparición para que inexorablemente surja la respuesta productiva.

El aumento anual en la producción de alimentos por habitante –a escala global y en los países en desarrollo– muestra cierta tendencia al estancamiento y parece que la Revolución Verde va perdiendo vigor. Además, algunos factores esenciales de la producción agrícola, tales como la energía, el agua dulce y el suelo laborable, se aproximan cada vez más al límite de su disponibilidad.

El crecimiento de la población mundial ha superado las expectativas de Malthus, aunque se está produciendo un retardo del crecimiento, desde tasas anuales superiores al 2%, propias del periodo 1965-1970, a las tasas en torno al 1%, que se esperan para el año 2025. Acabamos de superar los 6.000 millones de habitantes y la proyección más optimista para esta última fecha se cifra alrededor de los 7.800 millones.

La extendida opinión de que los cultivos transgénicos no están contribuyendo a solucionar el hambre en el mundo es rotundamente falsa, y puede bastar una reciente anécdota para desacreditarla. En Estados Unidos, el desvío de una fracción creciente (23% en 2007) de la cosecha de maíz hacia la producción de etanol, junto a la creciente demanda de grano desde países como China o India, hizo que en 2006 la cotización del grano en el mercado de materias primas de Chicago se duplicara (de unos 80 dólares por tonelada a unos 160), en una tendencia que se ha mantenido hasta 2008, sin que parezca que vaya a desinflarse. La subida del precio del maíz transgénico ha motivado que países como México reduzcan sus importaciones de maíz-pienso (transgénico) y que la «etanoinflación» se transfiera al maíz blanco de producción autóctona, alimento básico de la población, ya que es el ingrediente de las míticas tortillas y de otros platos fundamentales. La duplicación del precio de las tortillas ha provocado masivas manifestaciones de protesta que han inundado el Zócalo de México DF a principios de este año. El alto precio del maíz hace que se dediquen a su producción tierras previamente dedicadas a otras producciones (p. ej.: arroz o soja) y que se eleven los precios de éstas, por menor oferta. Suben los precios de las carnes y, por ejemplo, se estimula la deforestación del Amazonas para producir maíz o para disponer de pastos para el ganado.

Para aportar una dieta adecuada y diversificada se calcula que sería necesaria 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 como resultado del aumento demográfico y de la dificultad de conseguir un aumento neto del suelo laborable.

Dadas las limitaciones señaladas, no queda más opción que aumentar la productividad –producción por unidad de superficie cultivada– si queremos salvar nuestro futuro alimentario. Sin embargo, una agricultura intensiva cómo 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, por lo que 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 han sido, son y seguirán siendo 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. En la respuesta a este doble reto, la moderna biotecnología desempeñará un papel prominente, aunque no exclusivo.

10. Bibliografía

- GARCÍA OLMEDO, F. (1998): *La tercera revolución verde*. Madrid, Debate.
- GARCÍA OLMEDO F. (en prensa): *Los artificios de Ceres*. Barcelona, Crítica.
- GARCÍA OLMEDO, F. y CARBONERO, P. (2003): *Las plantas en su entorno*. Madrid, Instituto de España.
- GARCÍA OLMEDO, F.; PUIGDOMENECH, P. y BELTRÁN, J. P. (2003): *Plantas transgénicas*. Salamanca, Ediciones de la Universidad de Salamanca.
- GARCÍA OLMEDO, F.; SANZ MAGALLÓN, G. y MARTÍN PALMA, E. (2001): *La agricultura española ante los retos de la biotecnología*. Madrid, Instituto de Estudios Económicos.
- GLICK, B. R. y YPASTERNAK, J. J. (2000): *Molecular Biotechnology. Principles and applications of recombinant DNA*. Washington DC, ASM Press.
- JAMES, C. (2008): *Situación mundial de la comercialización de cultivos biotecnológicos/transgénicos en 2007. Resumen ejecutivo*. Zaragoza. Ibercaja / ISAAA.