

Plantas transgénicas frente a la realidad del mercado

Transgenic Plants and Market Reality

Pedro Rocha S.¹

Resumen

Desde hace algunos años, en los círculos académicos, económicos, políticos y sociales se habla de los organismos modificados genéticamente (OMG) y las plantas transgénicas. Adicionalmente en la literatura actual aparecen varios miles de artículos publicados sobre el tema en revistas que van desde las más exigentes y reconocidas a escala mundial hasta comunicados que no poseen ningún respaldo técnico-científico. En la presente revisión se exponen algunos conceptos básicos relacionados con la tecnología de la transformación genética, sus requerimientos y la aplicación real de la misma. Además se discuten algunos aspectos relacionados con la bioseguridad y el estado de la tecnología transgénica en palma de aceite. Es de anotar que las ideas expresadas por el autor en ningún momento comprometen a la institución a la cual se encuentra vinculado.

Summary

Genetically modified organisms (GMO) and transgenic plants have been talked about for some time now in economic, academic, political and social circles. Additionally, current literature features thousands of articles on the subject that go from studies published in internationally recognized magazines to press releases that have no technical or scientific support. This revision outlines some basic concepts regarding genetic transformation technology, its requirements and its actual application. The paper also discusses some aspects related to biosafety and the state of the transgenic technology in oil palm. It is important to note that the views expressed in this paper are the author's and not necessarily shared by the institution to which he belongs.

Palabras clave

Genética, organismos modificados genéticamente, transformación genética, bioseguridad, palma de aceite.

¹ Ph. D. Investigador titular, director del Laboratorio de Marcadores Moleculares, Cenipalma, Calle 21 No. 42C-17. Bogotá, Colombia. E-mail: pedro.rocha@cenipalma.org
Recibido: 6 de agosto de 2004. aprobado: 31 agosto de 2004

Introducción

La biotecnología moderna (también llamada tecnología del ADN recombinante, ingeniería genética o biología molecular) ha desarrollado estrategias poderosas para la manipulación de la información genética de los seres vivos. Una de tales herramientas es la *transformación genética*, la cual permite introducir características (genes) deseadas de cualquier organismo vivo a otro; por ejemplo, de una planta a otra, o a un animal, una bacteria y viceversa. Esta transferencia de información genética es posible debido a que todos los seres vivos contienen genes, todos los genes están conformados por ADN y la información de esta molécula se lee de la misma manera en todos los organismos para hacer proteínas. Los organismos generados mediante la aplicación de esta tecnología se conocen como *organismos transgénicos* u organismos modificados genéticamente (OMG).

En términos generales, un organismo transgénico es idéntico a uno no transgénico (o silvestre), las diferencias entre los dos se deben únicamente a la expresión de un número muy bajo de genes que pueden conferirle un mejor desempeño ante determinado factor cuando se compara con su equivalente silvestre. Esta es la regla, sin embargo, se hace necesario llevar a cabo pruebas que garanticen que una planta transgénica se diferencia de su equivalente no transgénico sólo en la característica objeto de la transformación; así una planta transgénica que porte el gen que le confiere resistencia a un herbicida se diferenciará de su equivalente silvestre sólo en esta característica, en ningún momento la modificación genética hará que la planta transgénica exhiba un comportamiento diferente frente a la sequía, la salinidad, o al ataque de patógenos. Ahora bien, si la modificación genética que se ha hecho involu-

era la inserción de un gen cuya proteína participa en diversas etapas del funcionamiento celular, seguramente la planta transgénica resultante exhibirá cambios en varias características asociadas o reguladas por la presencia del gen introducido (Rocha *et al*, 2002). A manera de ejemplo, plantas transgénicas de arroz que expresan el gen de la arginina decarboxilasa (*adc*) proveniente de la planta *Datura stramonium* L. incrementan los niveles endógenos (internos) de las poliaminas putrescina, espermina y espermidina (Capell *et al*, 2004). Sin embargo, el incremento en el contenido de tales sustancias confiere resistencia al estrés por sequía debido, posiblemente, a que estas moléculas intervienen en diferentes etapas del metabolismo celular y poseen múltiples funciones (Mendoza y Rocha, 2002).

En los siguientes párrafos se presenta información relacionada con las razones que motivan a desarrollar y usar plantas transgénicas, de manera adicional se describen algunos de los factores para tener en cuenta antes de tomar la determinación de sembrar plantas modificadas genéticamente. Posteriormente se considerarán algunos de los requisitos técnicos fundamentales para el desarrollo exitoso de plantas transgénicas y para finalizar se discutirá acerca del impacto de esta tecnología en palma de aceite.

¿Por qué hacer plantas transgénicas?

La tarea de un fitomejorador es la de diseñar cruces entre plantas que le permitan ensamblar una combinación de características (genes) deseables en una planta para que el cultivo de ésta sea más útil y productivo que el derivado de la planta original. Algunas combinaciones de genes pueden proveer características tales como mayor productividad o mejora de la calidad, resistencia a plagas y enfer-

Un organismo transgénico es idéntico a uno no transgénico (o silvestre), las diferencias entre los dos se deben únicamente a la expresión de un número muy bajo de genes que pueden conferirle un mejor desempeño ante determinado factor cuando se compara con su equivalente silvestre.

medades y tolerancia a la sequía, al frío o al calor, entre otras. Obtener la mejor combinación de genes en una planta es un proceso largo y difícil, en particular, en cultivos de plantas perennes como palma de aceite debido, entre otras razones, a que el mejoramiento tradicional ha estado limitado a incorporar genes diferentes con cruces artificiales de plantas dentro de la misma especie o con plantas de especies cercanas. Por ejemplo, un gen que codifica para una proteína de soya no podría ser transferido a una especie diferente, tal como maíz, mediante la utilización de técnicas tradicionales. La tecnología transgénica brinda al fitomejorador la posibilidad de juntar, en una misma planta, genes provenientes de un amplio rango de organismos vivos (otras plantas, animales, bacterias, virus, etc.) y no sólo de especies vegetales con un grado cercano de parentesco.

La biología molecular ha generado los medios técnicos para identificar y aislar genes que controlan características específicas en un organismo vivo. Además, ha desarrollado metodologías que permiten mover copias de estos genes de una especie a otra y transferir así las características de interés (transformación genética). Esta herramienta permite al fitomejorador hacer de manera más eficiente aquello que siempre ha hecho: generar variedades más productivas y útiles que contengan nuevas combinaciones de genes, pero sobrepasando las limitaciones impuestas por la polinización cruzada y las técnicas de selección.

Hasta el momento se ha presentado a la transformación genética como una herramienta muy poderosa para manipular la información genética de los seres vivos. Sin embargo, para que dicha herramienta sea utilizada con éxito en cultivos de plantas de interés comercial es necesario que cumpla con cuatro requisitos fundamentales: i)

una razón con fundamento de tipo económico o ecológico para realizar el proceso, ii) la disponibilidad de genes y de vectores, iii) un sistema de introducción de genes (transformación) eficiente y iv) un sistema de regeneración *in vitro* eficaz. En los siguientes párrafos se profundiza sobre cada uno de estos aspectos y su relación con la palma de aceite.

Razones para desarrollar plantas

transgénicas: economía y bioseguridad

Los análisis para determinar si es necesario y adecuado introducir o no la tecnología transgénica deben evaluar los costos en dinero y tiempo para su desarrollo e implementación, la información básica disponible relacionada con el problema, el impacto ambiental y social (análisis de riesgo), la regulación o normatividad legal existente en el país donde se llevará a cabo el cultivo y las posibles negociaciones a futuro, entre otros.

Aun cuando la biotecnología agrícola (también conocida como *biotecnología verde*) ha avanzado con rapidez, para muchos cultivos será difícil y lento cumplir con objetivos tales como generar plantas resistentes al ataque de múltiples patógenos y con tolerancia a herbicidas, evitar el deterioro en la poscosecha, generar resistencia a la sequía o tolerancia a suelos salinos, incrementar la productividad de los cultivos y mejorar la calidad de los alimentos, entre otros. Por ejemplo, para generar plantas transgénicas con resistencia a una amplia variedad de insectos y demás patógenos (hongos, virus, fitoplasmas) falta recorrer un camino largo y complejo. Hasta el momento, se han generado y comercializado plantas transgénicas de maíz (Ciba-Geigy, Monsanto), algodón (Monsanto, Calgene), papa (Monsanto) y tomate (Calgene) resistentes al ataque de algunos lepidópteros, dípteros y

coleópteros mediante tecnología basada en *Bacillus thuringiensis* (Bt). No obstante, estas plantas son susceptibles al ataque de hongos y virus. Por otra parte, se ha generado papaya transgénica resistente al *papaya ringspot virus* (Tennant *et al*, 1994) y caña de azúcar resistente al virus del síndrome de la hoja amarilla². Sin embargo, el desconocimiento de la biología básica de otras enfermedades que atacan a estos y a otros cultivos (como la pudrición de cogollo o la marchitez letal en palma de aceite) hace que a corto plazo no se hayan desarrollado estrategias efectivas basadas en tecnología transgénica para resolver, o al menos mitigar, los problemas relacionados con las enfermedades que atacan a estos cultivos.

Para tomar la decisión de invertir en el desarrollo de tecnología transgénica para un cultivo particular, es necesario tener en cuenta que los mercados y sobre todo la publicidad definen la introducción o no de esta tecnología. Por ejemplo, Monsanto generó papa transgénica resistente al ataque de insectos con el fin de comercializar un tubérculo cuyo manejo no requería de la utilización de pesticidas tóxicos tanto para la salud humana como para el ambiente. Sin embargo, la liberación del producto se llevó a cabo en un momento en que la desinformación y las duras críticas de los grupos ecologistas eran muy recias, lo que hizo que el producto no tuviera acogida y fuera retirado del mercado por razones ajenas a la compañía, pero dependientes en su totalidad de la percepción de los consumidores y de las empresas de alimentos que comercializarían el producto (McDonalds).

De otro lado, las decisiones políticas de los gobiernos también desempeñan un papel fundamental en el éxito o

fracaso de la comercialización de cultivos transgénicos. Por ejemplo, uno de los avances más significativos para el bienestar nutricional de la humanidad, liderado por el doctor Ingo Potrykus (Institute for Plant Sciences, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Suiza) ha sido la creación del *arroz dorado* (arroz enriquecido con vitamina A), el cual fue generado mediante tecnología transgénica y consistió en la inserción simultánea de tres genes (*cotransformación*) que codificaban para las enzimas fitoeno sintasa (*psy*), licopeno- β -ciclase y fitoeno desaturasa bacteriana (*crtl*) aislados de la planta de narciso y de la bacteria *Erwinia uredovora*. Dichos genes fueron introducidos mediante el empleo de *Agrobacterium tumefaciens* en la variedad de arroz IR69 (Ye *et al*, 2000). Desde un principio se concibió que este *arroz* sería distribuido gratuitamente a los países en vía de desarrollo para que así se contribuyera a aliviar la problemática asociada a deficiencia de vitamina A que sufren alrededor de 124 millones de niños y que se traduce en 250.000 casos anuales de ceguera como consecuencia de una carencia extrema de esta vitamina (Ye *et al*, 2000).

El proceso técnico que culminó con la generación de semillas de arroz dorado tardó alrededor de quince años, las negociaciones con las multinacionales dueñas de las patentes relacionadas con este arroz demoraron tan sólo seis meses, pero los estudios de las solicitudes que buscan la autorización de los gobiernos para llevar a cabo siembras experimentales y hacer los análisis de bioseguridad respectivos han tardado más de cinco años y aún no está claro cuánto tiempo más se necesitará. Así es evidente que la excesiva regulación se convierte en una barrera contra el desarrollo de esta tecnología (Ammann, 2004).

2. Fernando Ángel. Cenicaña (Colombia), comunicación personal, 2004.

Una de las razones esgrimidas para ser tan excesivamente cautos con el desarrollo, la implementación y la comercialización de la tecnología transgénica está relacionada con los riesgos potenciales que podría tener sobre la salud de las personas y sobre la integridad del medio ambiente. A pesar de ello, la vasta evidencia científica existente hasta el momento ha concluido que las plantas genéticamente modificadas o plantas transgénicas no han causado ni causan ningún efecto nocivo sobre la salud humana ni sobre el medio ambiente (Ammann, 2004; Gatehouse *et al*, 2002, Carpenter *et al*, 2002 y las referencias allí incluidas). Es más, se han encontrado beneficios ecológicos como resultado de la disminución de plaguicidas y demás biocidas que causan un daño enorme al suelo, a las fuentes de agua, a los operarios de campo, e incluso al consumidor final (Ammann, 2004; Carpenter *et al*, 2002, Carpenter, 2001).

Un punto importante para tener en cuenta en los análisis de riesgo es considerar el posible impacto que tenga la liberación de plantas transgénicas sobre la pérdida de diversidad de los ecosistemas o la transferencia de genes no deseados al ambiente (Cano, 2004). Con respecto a la posible pérdida de diversidad se acepta como un riesgo potencial (Christou, 2002), pero cuya probabilidad disminuye mediante la siembra de plantas transgénicas en sitios diferentes a aquellos de donde la planta transgénica es centro de origen (por ejemplo, maíz en México). Por su parte, la disminución de riesgo para el escape o flujo de genes no deseables al ambiente se evalúa mediante pruebas de campo de bioseguridad dispuestas según la normatividad propia de cada país.

En Colombia la regulación para la introducción, transporte, uso, manejo, producción, liberación y comerciali-

zación de organismos modificados genéticamente de uso agrícola en el país está a cargo del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Para desarrollar esta labor recibe asesoría y apoyo del Consejo Técnico Nacional (CTN), el cual está conformado por miembros de los ministerios de Protección Social, Medio Ambiente y Agricultura y Desarrollo Rural, así como de científicos y representantes de distintos sectores de la sociedad. El cultivo de una nueva variedad de planta transgénica en Colombia es analizado independiente del tipo de modificación genética efectuado y de la variedad que haya sido modificada. La autorización del cultivo se realiza según la resolución ICA No. 03492. La evaluación técnica que respalda la decisión de aprobar o no el cultivo de una variedad transgénica la ejecuta el CTN, el cual establece los efectos en la producción agropecuaria y los agroecosistemas caso por caso. La comercialización de organismos modificados genéticamente es autorizada sólo después de que la evaluación de bioseguridad respectiva ha sido discutida y aprobada. Algunos ejemplos de cultivos comerciales de plantas transgénicas aprobadas por el CTN para ser sembrados en el país incluyen el clavel azul y el algodón Bollgard™ (Gallego *et al*, 2004). Es de mencionar que si bien estos cultivos contaron con un diseño experimental para evaluación de bioseguridad, en ningún momento se puede decir que Colombia es líder en tecnología transgénica. Pues aunque son utilizados no fueron desarrollados por ningún centro de investigación colombiano y es, a lo sumo, la misma relación de propiedad intelectual que se tiene con una semilla no transgénica comprada a una casa comercial cualquiera.

En resumen, la regulación de los comités de bioseguridad de los países debe ser lo suficientemente estricta

y completa como para disminuir al máximo los riesgos potenciales de la tecnología sobre el ambiente y la salud humana. Sin embargo, debe ser lo suficientemente flexible y veloz para permitir la comercialización de productos y ajustarse a la rápida evolución propia del campo de la biotecnología.

Disponibilidad de genes

Todos los seres vivos somos el resultado de la expresión de genes. Los genes son las unidades fundamentales de la información biológica. Estas entidades definen características tales como la altura de las plantas, el color de las flores, la producción de metabolitos secundarios, el tamaño de frutos, la resistencia al ataque de patógenos, etcétera (Rocha, 2002). Todos los seres vivos (transgénicos o silvestres) contienen genes. Evidentemente la naturaleza en millones de años de evolución se ha dotado de miles de genes que codifican para un número igualmente elevado de proteínas (Tabla 1). Así mismo, el hombre, relativamente en poco tiempo, ha desarrollado herramientas que le

permiten entender y manipular sus genes y los de otras especies. En consecuencia, cada uno de los miles de genes conocidos (<http://www.ncbi.org>) es susceptible de ser introducido a otra especie mediante técnicas de transformación genética. Sin embargo, el hecho de haber secuenciado los 25.498 genes de la planta modelo de dicotiledóneas, *Arabidopsis thaliana* (The Arabidopsis genome initiative, 2000), y los más de 50.000 genes de la planta modelo para monocotiledóneas, arroz (Goff *et al.*, 2002; Yu *et al.*, 2002), no ha permitido aún identificar todos los genes involucrados en la codificación de proteínas responsables de características de interés agronómico, tales como componentes de productividad y resistencia a enfermedades en estas especies ni en otras de interés económico como la palma de aceite.

A las técnicas que hacen posible la manipulación de los genes por parte del hombre es a lo que se le conoce como ingeniería genética. Usando tales técnicas es posible aislar la información genética (genes)

Tabla 1 Genomas secuenciados de diversas especies y número de genes reportados. Hasta el momento los genomas de varias docenas de organismos han sido secuenciados.

Organismo	Número de genes	Referencia
Bacterias		
<i>Agrobacterium tumefaciens</i> C58	~5.300	Goodner <i>et al.</i> 2001, Wood <i>et al.</i> 2001
<i>Streptomyces coelicolor</i>	7.825	Bentley <i>et al.</i> 2002
<i>Xylella fastidiosa</i>	2.985	Simpson <i>et al.</i> 2000, Bhattacharyya <i>et al.</i> 2002
Hongos		
<i>Neurospora crassa</i>	10.000	Galagan <i>et al.</i> 2003
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	5.885	Consortio internacional
Plantas		
<i>Arabidopsis thaliana</i>	25.498	The Arabidopsis Genome Initiative 2000
<i>Oriza sativa</i> spp. indica	46.022 a 55.615	Yu <i>et al.</i> 2002
<i>Oriza sativa</i> spp. japonica	32.000 a 50.000	Goff <i>et al.</i> 2002
Animales		
<i>Homo sapiens</i>	26.588	Venter <i>et al.</i> 2001
<i>Drosophila melanogaster</i>	~ 13.600	Adams <i>et al.</i> 2000
<i>Caenorhabditis elegans</i>		The <i>C. elegans</i> sequencing consortium 1998

Para mayor detalle se pueden visitar las siguientes páginas electrónicas:

http://www.genomenetwork.org/sequenced_genomes/genome_guide_index.shtml,

<http://www.tigr.org>

Tabla 2 Lista de algunas de las secuencias codificantes (genes) para enzimas de interés en palma de aceite anotados en la base de datos GENBANK.

Secuencia (gen)	Número de identificación en Genbank
Desaturasa Δ^9 -stearoil-ACP (SAD)	AF507965
Desaturasa Δ^4 -palmitoil-ACP (PAD)	AF424808
Sintasa t 1-deoxy-D-xylulose-5-phosphate de cloroplasto (dxs2)	AY611205
FEG1, un gen de la caja MADS relacionado con PISTILLATA y GLOBOSA	AF227195
Beta-ketoacyl-ACP sintasa II (KAS II)	AF220453
Nueva proteína de la familia de las defensinas	AX763483
Oxidasa 1-aminociclopropano-1- ácido carboxílico (Opac10)	AY254310
Defensina EGAD1	AF322914
Globulina 7S (GLO7A)	AF250228

de cualquier organismo vivo e introducirla en otro. Gracias a esta tecnología, desde hace ya más de dos décadas (Sanford, 1988; Herrera-Estrella *et al*, 1983) es posible manipular la información genética natural de un organismo de tal manera que se pueden alterar, agregar o anular características (técnicamente conocidas como fenotipos). Por ejemplo, es posible cambiar el color de las flores utilizando tecnología de ARN antisentido (Mol, 1999), introducir genes que confieren resistencia al ataque de patógenos (Walling, 2001), producir compuestos que normalmente no son producidos por la planta de interés (Rocha *et al*, 2001; Torres *et al*, 1999), alterar la altura, incrementar la eficiencia fotosintética, generar tolerancia a suelos ácidos o salinos, etcétera. Como se ve las posibilidades son muy grandes. Y son mayores a medida que se conoce la función de más genes, pues todos ellos podrían ser, al menos en teoría, introducidos y expresados en otras especies vegetales.

En palma de aceite pocas han sido las secuencias codificantes (genes) aisladas, clonadas y secuenciadas que estén disponibles (Tabla 2). A pesar de ello la disponibilidad de genes bacterianos y de otras plantas hace posible la generación de palmas transgénicas que produzcan compuestos normalmente no producidos

por ellas. Por ejemplo, el Malaysian Oil Palm Board (MPOB, Malasia) lleva a cabo experimentos para generar palmas transgénicas productoras de plásticos biodegradables (PHB y PHBV) mediante la inclusión de los genes *phbA*, *phbB* y *phbC* obtenidos de la bacteria *Wautersia eutropha* (Parveez *et al*, 2003; Masani *et al*, 2003; Masani y Parveez, 2003).

Como se ha descrito hasta ahora los genes son el núcleo de la tecnología transgénica. Existen miles de genes que podrían ser introducidos en una planta mediante esta tecnología, no obstante, es la función del gen y su importancia dentro de la característica de interés la que hace que un gen particular sea escogido para ser incorporado en experimentos de transformación genética.

Construcción de vectores de genes

Aunque los genes son piezas fundamentales para la transformación genética, ellos por sí solos no pueden expresar la proteína (o característica) que están codificando. Para ello es necesaria la presencia de secuencias que actúan como señales de iniciación (promotores) y de terminación para que la maquinaria celular exprese ese gen foráneo.

Todas estas estructuras (secuencia promotora, gen de interés y secuen-

cia de terminación) son incluidas en un vector, comúnmente conocido como *plásmido*. Los plásmidos son moléculas de ADN provenientes de bacterias que pueden ser manipulados mediante técnicas de biología molecular y se convierten así en vehículos de transporte de genes. Los plásmidos pueden ser modificados de tal manera que contengan varios genes de manera simultánea. Así es común incorporar junto al gen de interés un "complejo de selección", que contiene secuencias promotoras, de terminación y un gen de selección, que permite identificar y separar a las plantas transgénicas de posibles escapes.

A las técnicas que hacen posible la manipulación de los genes por parte del hombre es a lo que se le conoce como ingeniería genética.

Existe una gran variedad de promotores, de secuencias de terminación y de genes de selección, los cuales tienen eficiencias diferentes dependiendo de la especie, variedad o cultivar en el cual sean introducidos (Gatz y Lenk, 1998; Torres *et al.*, 1999). De manera adicional, se han generado metodologías de transformación con fragmentos de ADN lineales que contienen sólo la secuencia de interés, promotor y secuencia terminadora, lo cual reduce los posibles riesgos de incorporar material genético no deseado en la planta por transformar (*clean DNA technology*, Fu *et al.*, 2000). Es de anotar que muchos de los promotores empleados para transformación genética de plantas están cubiertos por patentes, lo cual se puede convertir en una limitante para su utilización a escala comercial si no se cuenta con un equipo negociador de propiedad intelectual (Cano, 2004).

En palma de aceite se han construido diferentes vectores para transformación (Othman *et al.*, 2003; Masani y Parveez, 2003; Masani *et al.*, 2001). Las secuencias promotoras o los vectores completos son probados en sistemas modelo como *Arabidopsis*

(Parveez, 2001) o utilizados directamente en tejidos de palma de aceite (Ramli y Siti, 2003).

Introducción de genes en plantas

Los genes pueden ser aislados mediante una variedad de metodologías (Sambrook y Russell, 2001), mientras que la introducción de los genes en plantas puede llevarse a cabo principalmente mediante uno de dos métodos: *Agrobacterium* y bombardeo de partículas. El método de *Agrobacterium* explota las características biológicas de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens* o *A. rhizogenes*. Estas bacterias causan la formación de tumores en plantas. Sin embargo, cuando el gen causante de la formación de tumores es removido y cambiado por un gen de interés, el mecanismo genético de la bacteria hace posible la inserción de tal gen en el genoma de la planta. Las ventajas de este método radican en su bajo costo, la variedad de procedimientos desarrollados (Clough y Bent, 1998; Chang *et al.*, 1994) y la amplia variedad de especies susceptibles de transformar. La principal desventaja está relacionada con la incorporación de parte del genoma bacteriano en el genoma de la planta.

El método de bombardeo de partículas (también conocido como biobalística) emplea pequeñas partículas de oro o tungsteno, que son previamente recubiertas con el ADN (gen) de interés (Sanford *et al.*, 1987) y que son aceleradas mediante descargas eléctricas (tecnología Accell™; Christou *et al.*, 1988; Christou y McCabe, 1993; Leech *et al.*, 2000) o de gases (tecnología Biolistic™; Sanford *et al.*, 1991) para introducir el gen en una célula blanco.

En palma de aceite la transformación mediante bombardeo de partículas ha sido estandarizada (Parveez y Christou, 1998) y es rutinariamente

empleada (Fadillah *et al*, 2001; Majid y Parveez, 2001). De manera adicional se ha generado un sistema de transformación mediante el empleo de *Agrobacterium*.

Sistema de regeneración eficaz

La transformación genética de plantas es totalmente dependiente de las técnicas de cultivo de tejidos, porque es gracias a la *totipotencia* celular exhibida por las células vegetales que la generación de plantas transgénicas puede ser un proceso considerado eficiente y ético. Si bien las técnicas de cultivo de tejidos (que incluyen propagación, embriogénesis, etc.) se han desarrollado desde la década de 1960, para algunos cultivos la transformación encuentra un cuello de botella debido a la dificultad en los procesos de regeneración de plántulas y formación de raíces (enraizamiento).

Aunque la transformación genética se ha popularizado, en ningún momento quiere decir que sea un proceso sencillo de llevar a cabo. Por lo general, la generación de una planta transgénica involucra un proceso de ensayo y error en el cual se requiere de la optimización de cada uno de los pasos que comprenden la técnica de transformación. Además, requiere de una infraestructura que comprenda espacios de trabajo estériles y utilización de reactivos y equipos por lo general costosos. Eso sin contar con las autorizaciones para el acceso a secuencias que se encuentran patentadas y el tiempo que toma la optimización de cada etapa en un experimento transgénico.

El proceso de transformación no termina con una planta *in vitro*. Al contrario, es el punto inicial del im-

pacto de la tecnología. Las plantas transgénicas obtenidas deben ser llevadas a invernaderos para aclimatación y posteriormente ser transferidas a campo. Las plantas transgénicas adultas se cruzan mediante técnicas convencionales atendiendo a la reglamentación que sobre el tema tenga el país en el cual se planea sembrarlas. Es importante anotar que los cruzamientos derivados de progenitores transgénicos no son muy eficientes, pues en su gran mayoría los primeros transformantes presentan problemas de esterilidad (Rocha *et al*, 2002). De todas maneras, los pocos individuos fértiles producen una cantidad baja de semilla que es propagada convencionalmente.

Para palma de aceite, luego de un arduo y largo proceso de investigación en cultivo de tejidos (revisado por Corley y Tinker, 2003; Rohani *et al*, 2000), llevado a cabo por diferentes instituciones de (MPOB, CIRAD, universidades y compañías), se han establecido procedimientos adecuados para la regeneración y propagación de plántulas (Cheah, 2003; Rival *et al*, 2001; Cochard *et al*, 1999). Por tanto, la presencia de un sistema de regeneración y propagación eficaz en palma de aceite hace que este factor no sea una barrera, sino al contrario un gran avance, para el desarrollo de la tecnología transgénica.

Cultivos transgénicos en el mundo

Para el año 2003 el área sembrada con cultivos transgénicos (de soya, maíz, algodón y colza) se estimó en 67,7 millones de hectáreas, distribuidas en 18 países, vinculando alrededor de siete millones de agricultores y con un valor estimado de 4.500 a 4.750 millones de dólares (James, 2003). Dichas cifras reflejan un in-

3. Kulaveerasingham Harikrishna, Sime Darby Technology Centre Sdn. Bhd (SDTC, Malasia); Universiti Putra Malaysia (Malasia). comunicación personal, 2003.

crecimiento de 40 veces el área global de cultivos transgénicos sembrada en 1996. Cerca de 20 millones de hectáreas están sembradas en países en vía de desarrollo. Las estadísticas sobre cultivos transgénicos se encuentran disponibles en la página <http://www.isaaa.org>.

La característica predominante en cultivos transgénicos es la de tolerancia a herbicidas seguida por resistencia a insectos. En el año 2003 los primeros ocuparon 49,7 millones de hectáreas (73% del total sembrado) mientras que los cultivos resistentes a insectos ocuparon 12,2 millones de hectáreas (18% del total).

En Colombia, como se mencionó, se ha autorizado la liberación comercial de algodón Bollgard y la siembra comercial de clavel azul (Cano, 2004; Gallego *et al*, 2004). También existen varios ensayos de investigación confinados en especies de arroz, pastos (*brachiaria*), yuca, caña de azúcar, tomate y frutales, entre otros (Gallego *et al*, 2004).

La efectividad relacionada con incremento de producción y disminución de los costos de producción de las variedades de plantas transgénicas cultivadas ha sido demostrada, desde hace ya varios años, en el caso de plantas transgénicas con resistencia a virus, insectos o herbicidas. Para 1996 y 1997 se reportó un incremento medio en la producción de cultivos transgénicos entre 5 y 10% y un ahorro hasta de 40% en herbicidas y entre 150 a 300 dólares por hectárea (Herrera-Estrella, 1999).

Sin embargo, el ejemplo más claro del efecto económico de la tecnología transgénica sobre el sector de la agricultura puede ser visto en Argentina, el país con más alta tasa de adopción de cultivos de plantas modificadas genéticamente (Trigo y Cap, 2003). El primer cultivo trans-

génico introducido en Argentina fue el de soya tolerante a glifosato, liberado en 1996. Así para el año 2002, el 90% de las 12 millones de hectáreas sembradas con soya eran transgénicas. Los estudios económicos estiman que la soya transgénica redujo en 20 dólares por hectárea los costos de producción, principalmente debido a la reducción en los costos de energía como resultado de la aplicación más efectiva de técnicas de manejo de malezas (Trigo y Cap, 2003). Eso sin contar los beneficios ambientales relacionados con la introducción de labranza mínima y la disminución en el empleo de herbicidas altamente tóxicos como la atrazina (Trigo y Cap, 2003; Herrera-Estrella, 1999). Se ha estimado que si las variedades de soya modificadas genéticamente no hubiesen estado disponibles en Argentina, el área cultivada con soya sería solamente del 60% de la cultivada en la actualidad y la rentabilidad del sector habría sido alrededor de un 52% menor que la actual (Trigo y Cap, 2003).

Tecnología transgénica en palma de aceite

El mejoramiento genético de la palma de aceite es un proceso de enorme importancia para los cultivadores y para la economía en general. Sin embargo, es un proceso en extremo lento que tiene su explicación en la biología misma de la planta. Dentro de las alternativas para acelerar el proceso de generación de nuevos materiales, el MPOB ha desarrollado tecnología transgénica con el fin de apoyar su programa de mejoramiento genético. Para el MPOB los objetivos del programa de ingeniería genética de palma de aceite son modificar la calidad de los aceites, para propósitos de alimentación o industriales, y sintetizar nuevos productos de alto valor como

tocoferoles, tocotrienoles y vitaminas A y E (Parveez *et al*, 1999; Fadillah *et al*, 2001). El éxito en la consecución de tales retos se considera esencial para mantener la competitividad en el mercado mundial de aceites y grasas (Fadillah *et al*, 2001).

Desde el punto de vista nutricional, la ingeniería genética en palma de aceite debería enfocarse a generar palmas transgénicas con alto contenido de ácido oleico (Cheah, 1995; Choon-Yee y Chandran, 2000; Fadillah *et al*, 2001) y con contenidos considerables de ácido esteárico y de tocotrienoles. Palmas transgénicas con alto contenido de ácido oleico podrían ser generadas mediante: i) el incremento de la actividad de la enzima cetoacil-ACP sintasa II (KAS II) y ii) la reducción de la actividad tioesterasa hacia el palmitoil-ACP (Cheah *et al*, 1995; Parveez *et al*, 2003). Hasta el momento, solo se han generado plántulas y embrioides transgénicos a escala de laboratorio y falta aún tiempo para desarrollar y evaluar el desempeño de palmas transgénicas en el campo (Yaakop *et al*, 2003; Sambanthamurthi *et al*, 2002).

Se ha establecido la producción de palma de aceite transgénica con alto contenido de ácido esteárico mediante la reducción de la actividad desaturasa a través de tecnología antisentido (Othman *et al*, 2003). La manipulación de la palma de aceite para alto contenido de aceite con estearato brindará nuevas aplicaciones, en las cuales el aceite enriquecido en estearato será de utilidad como sustituto de la manteca de cacao y otras aplicaciones relacionadas con productos de cuidado personal tales como lociones, crema de afeitar y aceites. El gen que codifica para la enzima 9-estearoil-ACP desaturasa (SAD) ha sido aislado y secuenciado de una librería de ADNc construida de ARNm aislado del mesocarpio de frutos de 15 semanas

de *E. guineensis* var. Ténera (Shah y Rashid, 1996). La orientación antisentido de este gen en palmas ha incrementado los niveles de ácido esteárico (C18:0) como consecuencia de una reducción del contenido de ácido oleico (C18:1).

La producción de plásticos biodegradables (polihidroxibutirato, PHB) en el mesocarpio de frutos de palmas transgénicas se ha constituido en otro objetivo del programa de transformación genética de palma de aceite en Malasia. Hasta el momento se reporta la construcción de vectores y el inicio de la transformación de callos embriogénicos mediante bombardeo de partículas (Masani y Parveez, 2003; Masani *et al*, 2003).

Tecnología transgénica en palma de aceite en Colombia

Uno de los principales problemas del cultivo de palma de aceite en Colombia es la presencia de enfermedades tales como la pudrición de cogollo o la marchitez letal, entre otras. Una de las aplicaciones obvias de la tecnología transgénica podría ser la generación de palmas transgénicas con resistencia a estas enfermedades. Esa es la teoría y el idealismo. Sin embargo, la realidad y el pragmatismo establecen que, debido al desconocimiento de información básica sobre la biología, genética, bioquímica y fisiología tanto de la enfermedad como de la palma, el desarrollo de palmas transgénicas resistentes a estas enfermedades será difícilmente alcanzado a corto plazo (al menos en los próximos cinco años). Esta apreciación no debe ser vista como una crítica pesimista. Al contrario, debe tenerse como una posición realista frente a una tecnología que si bien es muy poderosa, no está completamente desarrollada y necesita mayor estudio para cultivos perennes. Por lo pronto el programa de mejoramiento genético de palma

Para el MPOB los objetivos del programa de ingeniería genética de palma de aceite son modificar la calidad de los aceites, para propósitos de alimentación o industriales, y sintetizar nuevos productos de alto valor como tocoferoles, tocotrienoles y vitaminas A y E

Desde el punto de vista nutricional, la ingeniería genética en palma de aceite debería enfocarse a generar palmas transgénicas con alto contenido de ácido oleico y con contenidos considerables de ácido esteárico y de tocotrienoles.

de aceite de Cenipalma, el cual está enfocado en generar materiales élite adaptados a las distintas condiciones de las zonas palmeras colombianas, está utilizando métodos tradicionales junto con procedimientos bioquímicos (HPLC) y moleculares (RAPD, AFLP y microsátélites) y en el proceso de selección de parentales y evaluación de progenies. Además desarrolla experimentos de caracterización morfoagronómica, bioquímica y molecular de diferentes accesiones de palma americana (*E. oleífera*) que, sin lugar a dudas, se constituye en la fuente de diversidad y de adaptación más valiosa con que cuenta el mejoramiento de *E. guineensis*.

Consideraciones finales

Son cuatro los factores por tener en cuenta para desarrollar tecnología transgénica en plantas: el primero es contar con una razón económica de peso, el segundo es tener genes de interés disponibles para su utilización, el tercero es que la planta objeto de modificación cuente con un sistema de transformación genética eficaz y cuarto que se disponga de un sistema de regeneración eficiente.

Todos los organismos vivos (transgénicos o no) contienen genes, miles de genes. Y éstos son miles de funciones y miles de productos. La manipulación genética de los organismos vivos es un hecho. Hasta el momento no se ha reportado que el cultivo de las plantas transgénicas ni sus productos sean nocivos a los seres humanos o al ambiente. Tampoco se ha demostrado que los cultivos transgénicos sean la solución a los problemas de hambre del mundo. Lo que sí es cierto es que la conveniencia o no de aplicar esta tecnología debe ser una decisión planeada cuidadosamente y que considere factores técnicos, éticos, económicos, ecológicos y legales, entre otros. Cada expe-

rimento transgénico es diferente, involucra diversos genes, vectores, plantas receptoras, etcétera. Además es indispensable la optimización de cada uno de los parámetros utilizados mediante el desarrollo de experimentos cuidadosamente diseñados y con soporte estadístico apropiado.

En el futuro se espera la comercialización de varios cultivos transgénicos (no sólo los cuatro "tradicionales") que exhiban muchas más categorías que la resistencia a herbicidas, tolerancia a plagas y a virus. Los cultivos transgénicos futuros ofrecerán beneficios adicionales debido a que serán diseñados para producir ingredientes de utilidad. Por ejemplo, en industrias de alimentos, madereras y de papel, de farmacéuticos, de nuevos materiales y de energía. La tecnología está disponible, las razones para generar cultivos transgénicos han sido expuestas, la regulación para la siembra y la comercialización de OMG está siendo estudiada y mejorada. Así la tecnología transgénica se convirtió para el fitomejorador en una herramienta más, cuya utilización racional permitirá desarrollar de manera significativa ciertos cultivos (como se ha visto en soya, maíz, algodón y canola) y se verá reflejada en el bienestar de todos los miembros de la sociedad y en su impacto positivo sobre el medio ambiente.

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a los doctores Esperanza Torres Rojas (Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, Sinchi, Bogotá) y Pedro León Gómez Cuervo (Cenipalma), así como a los evaluadores por sus valiosos comentarios como resultado de la crítica de este manuscrito. La investigación de Cenipalma es auspiciada por el Fondo de Fomento Palmero.

Bibliografía

- Ammann, K. 2004. The impact of agricultural biotechnology on biodiversity. A review. 94 p. <http://www.botanischergarten.ch/Biotech-Biodiv/Report-Biodiv-Bitech12.pdf>
- Adams, MD; *et al.* 2000. The genome sequence of *Drosophila melanogaster*. *Science* 287 (5461): 2185-2195.
- Bentley, SD; *et al.* 2002. Complete genome sequence of the model actinomycete *Streptomyces coelicolor* A3(2). *Nature* 417 (6885):141-147.
- Bhattacharyya, A; *et al.* 2002. Whole-genome comparative analysis of three phytopathogenic *Xylella fastidiosa*. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 99 (19): 12403-12408.
- Cano, CG. 2004. *Biotecnología y propiedad intelectual en el agro*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de la República de Colombia. Bogotá. 58 p.
- Capell, T; Bassie, L; Christou, P. 2004. Modulation of the polyamine biosynthetic pathway in transgenic rice confers tolerance to drought stress. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 101 (26): 9909-9914.
- Carpenter, J. 2001. GM crops and patterns of pesticide use. *Science* 292 (5517): 637.
- Carpenter, J; *et al.* 2002. Comparative environmental impacts of biotechnology-derived and traditional soybean, corn and cotton crops. Council of Agricultural Science and Technology, Sponsored by the United Soybean Board. Ames, Iowa. 189 p. Publicación disponible en los sitios www.cast-science.org y www.talksoy.com.
- Chang, SS; *et al.* 1994. Stable genetic transformation of *Arabidopsis thaliana* by *Agrobacterium* inoculation in planta. *Plant J.* 5 (4): 551-558.
- Cheah, SC. 2003. Understanding the causes of oil palm tissue culture abnormalities on the road to commercialization. *Proceedings of the Pipoc 2003 International Palm Oil Congress (Agriculture)*. A6, p.121-128.
- Choon-Yee, JT; Chandran MR. 2001 GM-crops: Possible impacts on the Malaysian palm oil industry. *Proc. of the National Seminar June 2001*. p. 1-29.
- Christou, P; McCabe, DE. 1993. Direct DNA transfer using electric discharge particle acceleration (accelTM technology). *Plant Cell Tiss. Org. Cult.* 33: 227-236.
- Christou, P; McCabe, DE; Swain, WF. 1988. Stable transformation of soybean callus by DNA-coated gold particles. *Plant Phys.* 87: 671-674.
- Clough, SJ; Bent, AF. 1998. Floral dip: a simplified method for *Agrobacterium*-mediated transformation in *Arabidopsis thaliana*. *Plant J.* 16: 735-743.
- Cochard, B; *et al.* 1999. Performance of adult oil palm clones. *Proceedings of the 1999 Porim International Palm Oil Congress (Agriculture)*. A6, p.12-22.
- Corley, RHV; Tinker, PB. 2003. *The oil palm*. Blackwell Science, Oxford. p. 201-215.
- Fadillah, HH; *et al.* 2001. Construction of antisense desaturase gene transformation vectors for the production of high stearate transgenic oil palm. *Proceedings of the 2001 PIPOC International Palm Oil Congress (Agriculture)*. P11: p.723-734.
- Fu, XD; *et al.* 2000. Linear transgene constructs lacking vector backbone sequences generate low-copy-number transgenic plants with simple integration patterns. *Transgenic. Res.* 9 (1): 11-19.
- Galagan, JE; *et al.* 2003. The genome sequence of the filamentous fungus *Neurospora crassa*. *Nature* 422 (6934): 859-868.
- Gatehouse, AMR; Ferry, N; Raemaekers RJM. 2002. The case of the monarch butterfly: a verdict is returned. *Trends in Genetics* 18 (5): 249-251.
- Gatz, C; Lenk, I. 1998. Promoters that respond to chemical inducers. *Trends Plant Sci.* 3 (9): 352-358.
- Gallego, A; Morales, SS; Chaparro, A. 2004. Alimentación humana y organismos transgénicos ¿una relación peligrosa? *Innovación y Ciencia (Colombia)* 11 (2): 32-39.
- Goff, SA; *et al.* 2002. A draft sequence of the rice genome (*Oryza sativa* L. ssp. *japonica*). *Science* 296 (5565): 92-100.
- Goodner, B; *et al.* 2001. Genome sequence of the plant pathogen and biotechnology agent *Agrobacterium tumefaciens* C58. *Science* 294 (5550): 2323-2328.
- Herrera-Estrella, L. 1999. Transgenic plants for tropical regions: Some considerations about their development and their transfer to the small farmer. *Proc Natl. Acad. Sci. USA.* 96 (11): 5978-5981.
- Herrera-Estrella, L; *et al.* 1983. Expression of chimaeric genes transferred into plant cells using a Ti plasmid-derived vector. *Nature* 304: 209-213.
- James, C. 2003. Global status of commercialized transgenic crops: 2003. Executive summary. Disponible en <http://www.isaaa.org>
- Leech, MJ; *et al.* 2000. Particle gun methodology as a tool in metabolic engineering. In: Verpoorte, R; Alfermann, AW. *Metabolism Engineering of Plant Secondary Metabolism*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. P.69-86.
- Majid, NA; Parveez, GKA. 2001. Towards the production of transgenic oil palm expressing *gfp* gene. *Proceedings of the 2001 Pipoc International Palm Oil Congress (Agriculture)*. P5, p. 686-693.
- Masani AMY; Parveez, GKA. 2003. Construction of transformation vectors for synthesizing biodegradable plastics in the mesocarp of transgenic oil palm. *Proceedings of the Pipoc 2003 International Palm Oil Congress (Agriculture)*. A-P14, p. 789-802.

- Masani AMY; Ho CL; Parveez, GKA. 2003. Transformation of oil palm with PHB and PHBV gene constructs driven by combination of constitutive promoters. *Proceedings of the PIPOC 2003 International Palm Oil Congress (Agriculture)*. A-P15, p. 803-812.
- Masani AMY; Ho CL; Parveez, GKA. 2001. Construction of PHB gene expression vectors for the production of biodegradable plastics in transgenic oil palm. *Proceedings of the 2001 PIPOC International Palm Oil Congress (Agriculture)*. P6 p. 694-711.
- Mendoza C; Rocha, PJ. 2002. Poliaminas: reguladores del crecimiento con múltiples efectos en las plantas. *Palmas (Colombia)* 23 (4): 39-46.
- Mol, J; Grotewold E; Koes, R. 1999 How genes paint flowers and seeds. *Trends Plant Sci.* 3 (6): 212-217
- Morcillo, F; *et al.* 2001. Regulation of 7S globulin gene expression in zygotic and somatic embryos of oil palm. *Physiol. Plantarum* 112 (2): 233-243.
- Othman, A; Stobart, AK; Lazarus, CM. 2003. Towards manipulating acyl-thioesterase activity in oil palm. *Proceedings of the PIPOC 2003 International Palm Oil Congress (Agriculture)*. A-P8, p. 742-750.
- Parveez, GKA. 2001. Development of *Arabidopsis thaliana* transformation: a model system for evaluating oil palm transformation vectors. *Proceedings of the 2001 PIPOC International Palm Oil Congress (Agriculture)* P10, p. 712-722.
- Parveez, GKA; Christou P. 1998. Biolistic-mediated DNA delivery and isolation of transgenic oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) embryogenic callus cultures. *J. Oil Palm Res.* 10: 29-38.
- Parveez, GKA; *et al.* 2003. Transfer of PHB and PHBV genes into oil palm for the production of biodegradable plastics. *Proceedings of the PIPOC 2003 International Palm Oil Congress (Agriculture)*. A-P21, p. 859-867.
- Rajinder, S; *et al.* 2001. Genomic strategies for enhancing the value of the oil palm. *Proceedings of the 2001 PIPOC International Palm Oil Congress (Agriculture)*. A2, p. 3-16.
- Ramli, Z; Siti, NAA. 2003. Development of a transient promoter assay system for oil palm. *J Oil Palm Res.* 15 (2): 62-69.
- Rival, A; *et al.* 2001. Oil palm biotechnology: progress and prospects. *OCL* 8 (4): 295-306.
- Rocha, P. 2002. Teoría y práctica para la extracción y purificación del ADN de palma de aceite. *Palmas (Colombia)* 23 (3): 9-17.
- Rocha, P; *et al.* 2002. Functional expression of tropine reductase I (*trI*) and hyoscyamine-6 β -hydroxylase (*h6h*) from *Hyoscyamus niger* in *Nicotiana tabacum*. *Plant Sci.* 162 (6): 905-913.
- Rohani, O; *et al.* 2000. Tissue culture of oil palm. In: *Advances in oil palm research*. MPOB. Kuala Lumpur. P.238-283.
- Sambanthamurthi, R; Siti Nor Akmar, A; Parveez, GK. 2002. Genetic Manipulation of the oil palm –challenges and prospects. *The Planter* 78 (919): 547-562.
- Sambrook, J; Russell, DW. 2002. *Molecular cloning a laboratory manual*. 3^a edition. CSHL Press.
- Sanford, JC; *et al.* 1991. An improved, helium-driven biolistic device. *Technique*, 3: 3-16.
- Sanford, JC; Klein, TM; Wolf, ED. 1987. Delivery of substances into cells and tissues using particle bombardment process. *J. Part. Science Tech.* 6: 559-563.
- Shah, FH; Rashid, O. 1996. The isolation and sequencing of the cDNA clone encoding steroyl-ACP desaturase from oil palm. *Plant Physiol.* 112:1399.
- Simpson, AJG; *et al.* 2000. The genome sequence of the plant pathogen *Xylella fastidiosa*. *Nature* 406: 151-157.
- Tennant, P; *et al.* 1994. Differential protection against Papaya Ringspot Virus isolates in coat protein gene transgenic Papaya and classically cross-protected papaya. *Am. Phytop. Soc.* 84 (11): 1359-1366.
- The Arabidopsis genome initiative. 2000. Analysis of the genome sequence of the flowering plant *Arabidopsis thaliana*. *Nature* 408 (6814): 796-815.
- The *C. elegans* sequencing consortium. 1998. Genome sequence of the nematode *C. elegans*: A platform for investigating biology. *Science* 282 (5396): 2012-2018.
- Torres, E; *et al.* 1999. Rice cell culture as an alternative production system for functional diagnostic and therapeutic antibodies. *Transgenic Res.* 8 (6): 441-449.
- Tregear, JW; *et al.* 2002. Characterization of a defensin gene expressed in oil palm inflorescences: induction during tissue culture and possible association with epigenetic somaclonal variation events. *J. Exp. Bot.* 53 (373): 1387-1396.
- Trigo, EJ; Cap, EJ. 2003. The impact of ge introduction of transgenic crops in Argentinean agricultura. *AgBioForum* . 6 (3): 87-94.
- Venter, JC; *et al.* 2001. The Sequence of the Human Genome. *Science* 291 (5507): 1304-1351.
- Walling, LL. 2001. Induced resistance: from the basic to the applied. *Trends Plant Sci.* 6 (10): 445-447.
- Wood, DW; *et al.* 2001. The genome of the natural genetic engineer *Agrobacterium tumefaciens* C58. *Science* 294 (5550): 2317-2323.
- Yaakop, S; *et al.* 2003. Molecular and fatty acid analyses of transformed oil palm cultures and plantlets. *Proceedings of the PIPOC 2003 International Palm Oil Congress (Agriculture)*. A-P20, p. 852-858.
- Ye, X.; *et al.* Engineering provitamin A (b-carotene) biosynthetic pathway into (carotenoid-free) rice endosperm. 2000. *Science* 287 (5451): 303-305.
- Yu, J; *et al.* 2002. A draft sequence of the rice genome (*Oryza sativa* L. ssp. *indica*). *Science* 296 (5565): 79-92.

GLOSARIO

Arroz dorado: es el nombre dado al arroz transgénico que produce vitamina A. Este producto se constituye en un ejemplo de cómo la biotecnología puede crear una ruta metabólica completa en una planta para producir un compuesto que por métodos naturales jamás se podría obtener.

Biotechnología verde: es una denominación común para describir la biotecnología que se desarrolla con plantas. También se conoce como "agrobiotecnología". La biotecnología que se desarrolla para generar soluciones a problemas médicos se denomina "biotecnología roja" y la que concierne al medio ambiente e industrialización se denomina "biotecnología blanca".

Cotransformación: es un tipo de transformación genética en el cual se introducen varios plásmidos que llevan genes diferentes simultáneamente en una planta.

Organismos transgénicos: son todos aquellos seres vivos generados como resultado de la transformación genética. También se conoce a estos organismos como organismos modificados genéticamente.

Plásmido: es una molécula de ADN bacterial que no hace parte del genoma de la bacteria. Sin embargo, por ser un elemento extragenómico, puede ser transferido con facilidad de una bacteria a otra o incluso a células de otras especies vegetales o animales.

Totipotencia: es la capacidad de regenerar órganos completos a partir de partes del organismo o células aisladas. En otros términos, es la característica que tienen las células vegetales para diferenciarse en distintos tipos celulares. Por ejemplo, gracias a la totipotencia un fragmento de hoja puede regenerar una nueva planta idéntica de la cual se extrajo la hoja inicialmente.

Transformación genética: es un proceso que permite la introducción de información genética (genes) de un individuo a otro de manera independiente de su compatibilidad reproductiva. Mediante esta tecnología es posible introducir genes de animales a plantas o a microorganismos y viceversa.