eJOURNAL USA
Perspectivas Económicas
OCTUBRE DE 2005
LA PROMESA DE LA BIOTECNOLOGÍA
SOYBEAN POWDER
Departamento de Estado de Estados Unidos / Oficina de Programas de Información Internacional

PERSPECTIVAS ECONÓMICAS

Editor.....Jonathan Schaffer
Editor gerente.....Andrzej Zwaniecki
Colaboradores .....Kathleen E. Hug
.....Linda Johnson
.....Martin Manning
.....Kathryn A. McConnell
.....Bruce Odessey
Editora de ilustraciones.....Maggie J. Sliker
Diseño de portada.....Min-Chih Yao

Directora.....Judith S. Siegel
Editor ejecutivo.....Richard W. Huckaby
Gerente de producción.....Christian S. Larson
Gerente de producción adjunta.....Sylvia Scott

Junta editorial.....Alexander C. Feldman
.....Francis B. Ward
.....Kathleen R. Davis

Imágenes de portada: Jack Dykinga/ARS, Markus/Matzel/Peter Arnold, Inc., AP/WWP/USDA, y AP/WWP/NREL.

La Oficina de Programas de Información Internacional del Departamento de Estado de Estados Unidos publica cinco periódicos electrónicos — *Perspectivas Económicas*, *Cuestiones Mundiales*, *Temas de la Democracia*, *Agenda de la Política Exterior de Estados Unidos* y *Sociedad y Valores Estadounidenses*— que analizan los principales temas que encaran Estados Unidos y la comunidad internacional, al igual que la sociedad, los valores, el pensamiento y las instituciones estadounidenses.

Cada nuevo periódico se publica mensualmente en inglés, y lo siguen, de dos a cuatro semanas después, versiones en español, francés y portugués. Algunas ediciones selectas aparecen también en árabe, chino, persa y ruso. Los periódicos en inglés se publican aproximadamente cada mes.

Las opiniones expresadas en los periódicos no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas del gobierno de Estados Unidos. El Departamento de Estado de Estados Unidos no asume responsabilidad por el contenido y acceso constante a los sitios en la Internet relacionados con los periódicos electrónicos; tal responsabilidad recae enteramente en quienes publican esos sitios. Los artículos, fotografías e ilustraciones pueden reproducirse y traducirse fuera de Estados Unidos, a menos que incluyan restricciones específicas de derechos de autor, en cuyo caso debe solicitarse autorización a los propietarios de derechos de autor mencionados en el periódico.

La Oficina de Programas de Información Internacional mantiene números actuales o anteriores en varios formatos electrónicos, como así también una lista de los próximos periódicos,en “http://usinfo.state.gov/journals/jourspa.htm”. Se agradece cualquier comentario en la embajada local de Estados Unidos o en las oficinas editoriales:

Editor, Economic Perspectives
IIP/T/ES
U.S. Department of State
301 4th St. S.W.
Washington, D.C. 20547
United States of America
E-mail: ejecon@state.gov

ACERCA DE ESTE NÚMERO

Las nuevas tecnologías, ya sean en el campo de la medicina, la industria o la agricultura, a menudo generan inicialmente escepticismo público. En ninguna otra esfera es esto tan patente como en la biotecnología, donde las cuestiones de salud y del medio ambiente son objeto de vivo debate.

"Los intelectuales que abrigan ideas conservadoras sobre la biología están plenamente conscientes de la tendencia de nuestra especie de tener recelo ante lo nuevo y lo raro, y evidentemente desean aprovechar ese recelo como estrategia para contener el progreso biotecnológico", dice el escritor Ronald Bailey, en su libro *Liberation Biology* (Biología de la liberación), publicado en 2005.

Pero como señala Bailey, la opinión pública es inconstante y no siempre se entienden bien los beneficios del progreso tecnológico. Cita la fertilización y las tecnologías de láser óptico como sólo dos ejemplos de los cuales el público abrigaba temores o dudas, pero ahora apoya claramente estas tecnologías y valora los enormes beneficios que se pueden obtener de ellas.

Este número de *Perspectivas Económicas* examina algunas de las aplicaciones más prometedoras de la biotecnología, desde los microorganismos objeto de ingeniería genética que producen gases hidrógenos de desechos orgánicos y bacterias manipuladas para eliminar contaminantes ambientales, hasta los cultivos que aportan vitaminas a lo que comemos y los nuevos medicamentos para tratar enfermedades humanas como el Alzheimer y la diabetes.

Como afirma en la Introducción el asesor científico de la Casa Blanca, John Marburger: "Nuestro propósito no es simplemente comprender la enfermedad, sino curarla; no sólo consumir todo comestible que encontremos, sino hacer que sea más inocuo y más nutritivo; no sólo cosechar los productos fortuitos de la naturaleza para elaborarlos, sino hacer que sean más fuertes, inocuos y adaptados a nuestras necesidades".

Esperamos que al analizar cada uno de los artículos, nuestros lectores aumenten su conocimiento sobre el tremendo potencial que ofrece la biotecnología para mejorar la calidad de vida de personas en todo el mundo.

Los editores

PERSPECTIVAS ECONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE ESTADO DE ESTADOS UNIDOS / OCTUBRE DE 2005 / VOLUMEN 10 / NÚMERO 4

http://usinfo.state.gov/journals/jourspa.htm

ÍNDICE

La promesa de la biotecnología

4 Introducción
JOHN MARBURGER, DIRECTOR, OFICINA DE POLÍTICA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, OFICINA EJECUTIVA DEL PRESIDENTE

6 Los desafíos mundiales y la biotecnología
JENNIFER KUZMA, DIRECTORA ADJUNTA, CENTRO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y POLÍTICA PÚBLICA, UNIVERSIDAD DE MINNESOTA
Los gobiernos y otras organizaciones deben invertir en la investigación y el desarrollo biotecnológicos, dirigidos a productos que puedan ayudar a los países en desarrollo.

11 Recuadro: *Una reacción química para la biotecnología: el Premio Nobel de 2005*
Cheryl Pellerin, redactora de temas científicos del Departamento de Estado

12 El poder de transformación de la biotecnología médica
BILL SNYDER, REDACTOR PRINCIPAL DE TEMAS CIENTÍFICOS, CENTRO MÉDICO DE LA UNIVERSIDAD VANDERBILT
El perfeccionamiento futuro de las "terapias focalizadas", dirigidas a las causas biológicas subyacentes de la enfermedad, debería mejorar radicalmente la seguridad y eficacia de los medicamentos, y el advenimiento de tecnologías predictivas podría dar paso a una nueva era en la prevención de las enfermedades.

17 Recuadro: *La carrera contra el dopaje genético*
Huntington F. Willard, director, Instituto de Ciencias y Política del Genoma de la Universidad Duke, y vicecanciller para las ciencias del genoma del Centro Médico de la Universidad Duke

19 Biotecnología vegetal: Adelantos en alimentación, energía y salud
RICHARD HAMILTON, DIRECTOR GENERAL, CERES, INC.; RICHARD B. FLAVELL, DIRECTOR CIENTÍFICO, CERES, INC.; ROBERT B. GOLDBERG, CATEDRÁTICO DE BIOLOGÍA MOLECULAR, CELULAR Y DE DESARROLLO DE LA UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA, LOS ÁNGELES
Los adelantos en biotecnología agrícola darán por resultado plantas más resistentes a la sequía, al calor y al frío; plantas que exigirán menos aplicaciones de fertilizantes y plaguicidas, producirán vacunas para prevenir enfermedades contagiosas graves.

23 Recuadro: *Los insectos biotecnológicos*

24 El diseño de nuevos materiales y máquinas moleculares
SHUGUANG ZHANG, DIRECTOR ADJUNTO, CENTRO DE INGENIERÍA BIOMÉDICA, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY
La humanidad podrá usar algún día nanodispositivos para reparar órganos del cuerpo o rejuvenecer la piel, mejorar las capacidades humanas, aprovechar la ilimitada energía solar y lograr otras proezas que hoy parecen imposibles.

30 Recuadro: *¿Adónde se dirige la nanotecnología?*
Akhlesh Lakhtakia, catedrático eminente de ingeniería y mecánica, Pennsylvania State University

32 Estudio de caso: Proyecto Internacional de Secuenciación del Genoma del Arroz
C. Robin Buell, investigadora adjunta, Instituto de Investigación Genómica
El "mapa" de las características genéticas del arroz permitirá a los fitogenetistas acelerar sus programas de reproducción y desarrollar variedades de arroz más robustas, y a los agricultores mejorar sus métodos y extender las temporadas de cultivo.

35 Los orígenes de la biotecnología: el aprovechamiento de las posibilidades del ADN
Dinesh Ramde, redactor de la Associated Press
La rapidez con que cobró impulso la industria de la biotecnología, la magnitud de su éxito y el alcance de su impacto han sorprendido hasta a sus precursores.

39 Recuadro: *Los primeros 142 años de la biotecnología*

40 Reglamentación de la biotecnología agrícola en Estados Unidos

42 Glosario de términos de biotecnología

46 Bibliografía (en inglés)

48 Recursos en Internet (en inglés)

INTRODUCCIÓN

La biotecnología es el paso más reciente en el inveterado intento del ser humano para utilizar los procesos de la naturaleza con el fin de mejorar la condición humana. El término en sí unifica el conocimiento con la práctica, la ciencia con la tecnología. Podríamos haberlo empleado para describir la aparición de la agricultura, o la farmacología, o incluso el entrenamiento de atletas—actividades que han surgido de raíces antiguas y han adquirido formas exóticas y muy contemporáneas. En cada caso, la acumulación de conocimientos acerca de la naturaleza ha propuesto maneras de hacer que la vida sea más segura, más saludable y más productiva. Si bien el término biotecnología es relativamente nuevo y tiene connotaciones más limitadas, es bueno recordar su conexión con el pasado, especialmente cuando se habla de los beneficios que contiene para las culturas apartadas de las tradiciones de la ciencia moderna.

La biotecnología comienza con el estudio de las plantas y los animales, complicados y hermosos hasta en sus características más pequeñas. Los grandes artistas se han esforzado por capturar los detalles que subyacen la maravillosa diversidad de los pájaros, flores e insectos. Cada adelanto para ver las cosas a una escala más pequeña nos ha revelado nuevas maravillas, nuevas modalidades y nuevos comportamientos que explican los misterios de los elementos más grandes. Durante los últimos veinticinco años, estos adelantos nos han llevado a uno de los principales hitos de la naturaleza: Podemos ahora "ver" los átomos primordiales de los que se constituye toda materia. Debajo de este nivel se encuentra un enorme abismo hasta las densas médulas de los núcleos atómicos, cientos de miles de veces más pequeños que el átomo más pequeño, donde un mundo nuevo—un mundo igualmente hermoso, pero exánime—está siendo explorado por los físicos.

En otras palabras, por primera vez en la historia se puede explorar la vida en todo su espectro, desde las escalas más pequeñas hasta las más grandes. Las herramientas que lo han hecho posible recurren en gran medida a otros campos de la ciencia y requieren grandes inversiones que normalmente sólo pueden hacer los gobiernos. Sin embargo, lo que revelan estas herramientas se puede analizar y aprovechar con recursos relativamente limitados. Esto viene bien puesto que la naturaleza en pequeña escala es extraordinariamente compleja. Estamos lejos de comprender todo lo que podemos ver, y hasta con las nuevas herramientas la exploración del terreno de la vida consumirá las energías de comunidades enteras de científicos. El territorio es vasto y su cartografía y desarrollo son empresas internacionales.

Esta inmensidad del universo de los organismos vivos no sólo se extiende a la cantidad de especies, tipos de organismos y variedades de sustancias químicas que los hacen funcionar, sino también a los procesos de la vida. Desde los numerosos sistemas de reacciones químicas, transporte de material, flujo de información y apoyos mecánicos en la escala más pequeña, hasta las funciones

de los órganos y el comportamiento de los organismos en la escala más grande, el extraordinario volumen de información que se precisa para comprender incluso las formas de vida más simples es descomunal. No basta con poder ver estas cosas. Para poder comprenderlas se necesita almacenar una enorme cantidad de información, recuperarla de manera eficaz y procesarla para poner a prueba ideas sobre las causas y los efectos. Recién ahora la biología puede producir su propia tecnología gracias a que la tecnología informática ha madurado en nuestra era.

El ver en pequeño mediante la difracción de rayos X, la resonancia magnética y los microscopios electrónicos, y *pensar en grande* con computadoras rápidas, gigantescos bancos de datos y transferencia por banda ancha, son dos de los tres ingredientes que permiten que haya una "biotecnología". El tercer ingrediente poder hacer que las cosas ocurran en la escala más pequeña. Los medios para hacerlo varían, y con frecuencia hacen uso de los procesos propios de la vida para llevar a cabo nuestra dirección. Se trata de un concepto antiguo, parecido al de emplear las abejas para la polinización. Hoy utilizamos bacterias y virus para realizar nuestra cría microscópica. Pero utilizamos también láseres y sondas minúsculas y moléculas activadas sobre cuya efectividad hemos aprendido tras laboriosos experimentos. La manipulación de la materia en esta escala es de lo que trata la nanotecnología, y no es accidental el que la nanotecnología, la tecnología informática y la biotecnología se estén desarrollando juntas. Son tecnologías convergentes, y se alimentan unas a otras en una ecología compleja de descubrimiento, innovación y mayor eficacia humana.

La biotecnología es la aplicación de los tres ingredientes para alcanzar metas humanas. Nuestro propósito no es simplemente comprender la enfermedad, sino curarla; no sólo consumir todo comestible que encontremos, sino hacer que sea más inocuo y más nutritivo; no sólo cosechar los productos fortuitos de la naturaleza para elaborarlos, sino hacer que sean más fuertes, inocuos y adaptados a nuestras necesidades. La complejidad de la naturaleza, antaño un obstáculo a nuestros propósitos, se nos revela ahora como una fuente abundante de oportunidades para alcanzarlos. La forma en que aprovechamos estas oportunidades para el bien de la humanidad es lo que llamamos biotecnología. ■

John Marburger
Director, Oficina de Política Científica y Tecnológica
Oficina Ejecutiva del Presidente

LOS DESAFÍOS MUNDIALES Y LA BIOTECNOLOGÍA

Jennifer Kuzma

AP/WWP/NREL

Este autobús funciona con combustible diesel producido a partir de semilla de soja.

La biotecnología, si se utiliza adecuadamente, tiene el potencial de proporcionar alimentos más saludables y en mayor cantidad; reducir la dependencia de combustibles fósiles; y ofrecer curas más eficaces para las enfermedades. Las enzimas que pueden disolver material vegetal en biocombustible como el etanol conducirán eventualmente a la producción económicamente viable de productos bioenergéticos sostenibles. Una nueva variedad de arroz elaborado mediante la bioingeniería y reforzado con vitamina A podría ayudar a reducir la ceguera que se origina a partir de la deficiencia vitamínica en los países en desarrollo.

Pero esta aplicación, y otras, conllevan riesgos que deben ser atendidos por medio de regímenes normativos y de seguridad. Los gobiernos y otras organizaciones deben también participar e invertir en la investigación y el desarrollo biotecnológicos, dirigidos a productos que puedan ayudar a los países en desarrollo a crear capacidad para beneficiarse de las innovaciones de la biotecnología.

***Jennifer Kuzma** es directora adjunta del Centro de Ciencia, Tecnología y Política Pública de la Universidad de Minnesota.*

La ciencia sólo puede afirmar lo que es, pero no lo que debería ser, y fuera de su dominio siguen siendo necesarios los juicios de valor de toda clase.

— Albert Einstein

Durante siglos los seres humanos han aprovechado el poder de los sistemas biológicos para mejorar sus vidas y el mundo. Algunos sostienen que la biotecnología comenzó hace miles de años, cuando se cruzaron variedades de cultivos para conseguir características determinadas y se utilizaron microorganismos para elaborar cerveza. Otros establecen el comienzo de la biotecnología a partir de la aparición de técnicas que permiten a los investigadores manipular y trasladar genes de un organismo a otro. El descubrimiento de la estructura del ácido desoxirribonucleico (ADN) en la década de 1950 marca el comienzo de esta era. Los genes se forman a partir de ADN y se expresan en proteínas, las cuales llevan a cabo tareas químicas y forman estructuras que nos otorgan características determinadas. En la década de los setenta los científicos descubrieron y utilizaron el poder de las "tijeras" naturales - proteínas denominadas enzimas restrictivas - para retirar concretamente un gen de un tipo de organismo e insertalo en otro organismo relacionado, o sin relación. Así nació la tecnología de ADN recombinante, o lo que la mayoría de los expertos denominan ahora biotecnología moderna.

Los pioneros de la biotecnología no podían haber

imaginado nuestra capacidad actual para producir plantas que resisten enfermedades, animales que producen medicamentos en su leche y pequeñas partículas que seleccionan y destruyen las células cancerosas. Sin embargo, la biotecnología es más que ingeniería; es, también, un conjunto de instrumentos que permiten comprender los sistemas biológicos. La genómica se basa en estos instrumentos y es el estudio de los genes y de sus funciones. Mediante el uso de la biotecnología hemos determinado la composición, es decir, la "secuencia", de todo el conjunto de genes del ser humano y varios otros organismos. La información genómica nos está ayudando a evaluar mejor los factores comunes y la diversidad entre los organismos y los seres humanos, y a comprender y curar enfermedades, incluso ajustando los tratamientos al individuo.

La biotecnología, o en realidad cualquier tecnología, no existe en el vacío. Se deriva del quehacer humano y se ve afectada por el entorno social, cultural y político. La sociedad orienta y regula la tecnología, tratando de minimizar las deficiencias y de maximizar los beneficios. Muchos científicos de ciencias naturales y ciencias físicas preferirían una delimitación bien definida entre los intereses sociales y éticos y los intereses de la ciencia y la tecnología. Las polémicas recientes sobre el uso de organismos genéticamente modificados en la alimentación y la agricultura han ilustrado que esta frontera no es tan clara. No sólo hay una preocupación sobre la seguridad de los organismos modificados por la ingeniería genética sino que también existen diferencias culturales en la aceptación de los productos.

El contexto internacional de la tecnología es importante y se debe tener en cuenta. La biotecnología no es una panacea para los problemas mundiales, pero es una herramienta muy prometedora si se utiliza adecuadamente. Por otro lado, hay sistemas sociales que se ven afectados por las nuevas tecnologías y existe temor a crear una brecha aún mayor entre ricos y pobres si no tienen acceso a la tecnología todos los sectores de la sociedad. Teniendo presente ese contexto, este artículo describe diferentes desafíos mundiales y examina cómo se puede aprovechar la biotecnología para resolverlos de modo sostenible y equitativo.

Nati Harnik, AP/WWP

Gránulos de plástico hechos de maíz se vierten en un recipiente.

DESAFÍO ENERGÉTICO, CAMBIO CLIMÁTICO Y MEDIO AMBIENTE

Los combustibles fósiles son un recurso energético limitado y lo estamos gastando a un ritmo más rápido del que puede reemplazar la naturaleza. La biotecnología tiene un papel que desempeñar en el uso de fuentes de energía más renovables. La energía de la biomasa, por ejemplo, es una fuente de energía neutra en carbono, puesto que, en último término, las plantas toman de la atmósfera la misma cantidad de carbono que emiten. Los investigadores están elaborando mejores celulasas, es decir enzimas que pueden descomponer el material vegetal en biocombustibles como el etanol. Las mejores celulasas llevarán tarde o temprano a la elaboración de productos sostenibles de bioenergía, económicamente más eficaces.

Algunos sostienen que el cambio climático tendrá su mayor impacto en los pobres, quienes carecen de recursos para mudarse o adaptarse cuando suceden desastres naturales, o cuando cambian sus entornos. Una transición a la energía de la biomasa no sólo tendría efectos ambientales positivos, sino que podría ocasionar también el desarrollo económico de comunidades rurales en todo el mundo. Los agricultores podrían cultivar plantas para sus necesidades alimentarias, de forraje y energéticas. Sin embargo, deben primero tener acceso a la tecnología que haga posible la conversión a la biomasa. Será difícil llevar semejantes tecnologías a las zonas rurales y crear la capacidad para operar esos sistemas.

Entre otros ejemplos de las aplicaciones energéticas y ambientales de la biotecnología cabe mencionar los microorganismos elaborados para producir gas hidrógeno de desechos orgánicos, las plantas producto de la bioingeniería que fabrican polímeros biodegradables, las máquinas moleculares basadas en las proteínas fotosintéticas de plantas para aprovechar la energía del sol, las bacterias elaboradas para disolver contaminantes ambientales y los biosensores desarrollados para detectar rápidamente los contaminantes ambientales peligrosos. A menudo se pasan por alto las aplicaciones ambientales de la biotecnología, o no se les asigna los fondos suficientes, pero la sostenibilidad de nuestro planeta ante una población cada vez mayor es un asunto de suma importancia.

AGRICULTURA, CALIDAD ALIMENTARIA Y SEGURIDAD

La biotecnología ha cobrado auge en sectores de la alimentación y de la agricultura. Por ejemplo, la bioingeniería genética ha creado algodón, soja, maíz y otros cultivos que contiene proteínas de la bacteria *Bacillus thuringiensis* (Bt), que los protege de las plagas de insectos. Los cultivos Bt se cultivan extensamente en muchos países. El cultivo del algodón Bt en China ha reducido significativamente el uso de pesticidas químicos peligrosos para la salud humana, en beneficio de los agricultores.

Por otro lado, se han dado situaciones preocupantes asociadas con los cultivos Bt. El Starlink era una variedad de maíz Bt autorizada en Estados Unidos para uso en pienso animal, dados los interrogantes sobre su potencial como alérgeno. Sin embargo, llegó finalmente a contaminar algunos productos de maíz en la cadena alimentaria humana. Asimismo, se han descubierto genes con proteínas Bt en algunas variedades de maíz mexicano, aunque México tiene una moratoria para la plantación de maíz Bt. Esta contaminación ha motivado inquietud, dado que México es el centro geográfico de la diversidad del maíz y muchos desean preservar las variedades nativas por razones culturales y agronómicas. Por lo tanto, a fin de obtener los beneficios de los cultivos producto de la ingeniería genética, es importante que se desarrollen buenos regímenes internacionales de seguridad biológica para evitar futuros accidentes y aumentar la confianza en el uso de estos cultivos.

También se están desarrollando por medio de la biotecnología alimentos más saludables y nutritivos. A modo de ejemplo, más de 100 millones de personas sufren de deficiencia de vitamina A, problema que es responsable de centenares de miles de casos de ceguera todos los años. A través de la ingeniería genética los investigadores han creado una variedad de arroz para abastecer el precursor metabólico de la vitamina A. Este "arroz dorado" se cruza con variedades locales para mejorar sus propiedades de crecimiento en los países en desarrollo. Se han superado los obstáculos de propiedad intelectual para poder distribuir el arroz gratuitamente a los agricultores de subsistencia; esto es especialmente importante porque de otra manera el costo de la semilla podría ser prohibitivo. Los científicos están desarrollando otros cultivos con cantidades altas de hierro, vitamina E, aminoácidos esenciales y aceites más saludables.

Con vistas al futuro, podrían resultar útiles otras aplicaciones de la biotecnología a los alimentos y la agricultura. El Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas clasifica la escasez de agua dulce como segundo problema ambiental en importancia del siglo XXI, después del cambio climático. Los cultivos xerófilos y resistentes a la salinidad, adaptados para los países en desarrollo, podrían mejorar sobremanera la seguridad alimentaria en lugares donde la combinación de desastres naturales y tierras marginales seguramente llevará a hambrunas en un año dado. Mediante la genómica y la biotecnología moderna nos aproximamos cada vez más a poder descifrar, identificar y elaborar las numerosas características que controlan el uso del agua y la utilización de la sal en las plantas.

SALUD Y MEDICINA

Las aplicaciones médicas de la biotecnología son las que mejor conoce el público. Las células pluripotenciales y la clonación se han ganado una atención inusitada en la política nacional e internacional. Las células pluripotenciales son las células iniciales de un organismo de las que se ha mostrado que derivan diferentes clases de tejidos. Han reemplazado o reparado satisfactoriamente los tejidos dañados en modelos animales y encierran una gran promesa para tratar enfermedades humanas como el Alzheimer y la diabetes. Aunque la vasta mayoría de personas concuerda en que la clonación para producir seres humanos (clonación reproductiva) es inaceptable, es motivo de debate la clonación terapéutica, según la cual el proceso de clonación

Jay Laprete, AP/WWP

Un paciente se somete a terapia genética.

se utiliza sólo para cosechar células pluripotenciales. La clonación terapéutica podría suministrar células pluripotenciales que encajaran exactamente con las de un paciente, reduciendo al mínimo los graves riesgos asociados con el rechazo de tejidos. Estos métodos encierran una gran promesa. Sin embargo, los aspectos éticos, culturales y políticos asociados seguirán ocupando a los científicos y a los políticos en el futuro inmediato.

Una aplicación fundamental de la biotecnología en la medicina es el descubrimiento de medicamentos. Los seres humanos han descubierto fármacos en fuentes

naturales desde los albores de la historia. Ahora, la genómica y su campo asociado para las proteínas - la proteómica - nos han permitido descubrir medicamentos de una manera más sistemática. La automatización de los ensayos de aglutinantes bioquímicos en pequeñas fichas miniaturizadas llamadas micromatrices, permite a los científicos seleccionar en muy poco tiempo miles de compuestos químicos para identificar su eficacia contra proteínas que causan enfermedades. Esta selección de alto rendimiento, como se le denomina, no habría sido posible

Markus/Matzel/Peter Arnold, Inc.

Microdispositivo para un implante de retina.

si no se hubiera invertido durante años en investigaciones básicas de biotecnología.

Con el análisis de micromatrices se puede medir rápidamente la actividad de miles de genes. Muchos investigadores están aprovechando esta herramienta para determinar la actividad temprana en los genes cuando los seres humanos se infectan con patógenos. Para el futuro se proyectan exámenes rápidos, no invasivos, que serán especialmente importantes en el caso de infecciones que requieran tratamiento inmediato para reducir la dispersión y salvar vidas, como aquellas resultado de un atentado bioterrorista. Se están desarrollando también nanosensores a partir de partículas cuyo tamaño es casi 50.000 veces inferior al tamaño del diámetro de un cabello humano, para detectar la expresión proteínica y genética de las células individuales del cuerpo y permitir la evaluación de la salud de las células en las etapas iniciales de una enfermedad. El gobierno de Estados Unidos invierte millones de dólares en nanosensores que se pueden introducir en la sangre de los astronautas para vigilar constantemente su exposición a la radiación espacial.

Otro campo de gran promesa es la terapia genética, en la cual se aplican los genes a determinados órganos o tejidos enfermos del cuerpo para superar las deficiencias metabólicas. El uso de virus para aplicar genes ha demostrado tener riesgos para la salud humana, lo cual ha generado polémica para los ensayos clínicos con estos virus. La convergencia de la nanotecnología con la biotecnología permitirá métodos más seguros para la aplicación de genes, que no se sirvan de virus. En la actualidad se llevan a cabo en animales ensayos con nanopartículas sintetizadas químicamente que llevan genes o elementos terapéuticos a células enfermas.

La biotecnología desempeña también un papel importante en la prevención de enfermedades. Las vacunas producidas con métodos de ADN recombinante son por lo general más seguras que las vacunas tradicionales, porque contienen proteínas virales o bacterianas aisladas, en lugar de agentes causantes de enfermedad, muertos o debilitados. Sin embargo, muchas personas en los países en desarrollo carecen de acceso a cualquier tipo de vacuna, y mucho menos a aquellas derivadas de la biotecnología. En la actualidad la mayor parte de las vacunas precisan el almacenaje en frío y la aplicación profesional por medio de inyección. A raíz de ello, los investigadores investigan plantas elaboradas a partir de la ingeniería genética, con la finalidad de aplicar vacunas a través de los alimentos. Se calcula que el costo de la vacuna contra la hepatitis B derivada de plantas y administrada oralmente es una sexta parte que el costo de las vacunas actuales contra esa enfermedad. En aproximadamente unas 80 hectáreas se podrían cultivar cada año los antígenos suficientes para inmunizar a todos los bebés del mundo. Sin embargo, al igual que con los cultivos Bt, hay una preocupación general sobre los cultivos farmacéuticos porque podrían causar una polinización cruzada con cultivos de plantas alimenticias en el campo. Será especialmente importante desarrollar regímenes de seguridad biológica que utilicen cultivos que no tengan polinización cruzada (por ejemplo, esterilidad masculina) o que aíslen a los cultivos farmacéuticos (por ejemplo, en invernaderos).

LOS DESAFÍOS

Es notable que varios de los ejemplos anteriores estén relacionados con la Declaración del Milenio, un acuerdo concertado por más de 170 países en el año 2000 para atender la pobreza, el desarrollo económico y la preservación ambiental. No obstante la ciencia y la tecnología raramente se integran en programas internacionales centrados en el desarrollo económico y social. Se ha registrado un progreso importante en el cumplimiento de algunas de las metas de la Declaración del Milenio, tales como la reducción de la pobreza, el aumento de la educación primaria y la igualdad entre géneros, y la reducción de la mortalidad infantil. Sin embargo, se ha avanzado menos en la lucha mundial contra las enfermedades y la mejora de la sostenibilidad ambiental. Estos son desafíos en los que la biotecnología puede desempeñar un papel.

Las inversiones de cualquier nación en la ciencia y en la tecnología tarde o temprano darán fruto. Sin embargo, son igualmente importantes las inversiones para atender los aspectos sociales, políticos, culturales y éticos relacionados con las aplicaciones de la biotecnología. Hay buenas maneras de fomentar el diálogo sobre estos asuntos. Podríamos no llegar nunca a un acuerdo sobre algunas aplicaciones de la tecnología, como la clonación terapéutica, pero el diálogo conduce a la mejor comprensión de las opiniones de cada uno y al respeto por nuestras diferencias.

No deberíamos desatender los riesgos potenciales de la biotecnología para la salud y el medio ambiente. Necesitamos financiar estudios de estos efectos por organizaciones independientes. Deberían simplificarse los sistemas formativos para que sean eficaces, eficientes y transparentes. En la actualidad hay pocos incentivos para el estudio independiente de políticas y sistemas reglamentarios.

Finalmente, necesitamos invertir en tecnologías que se ajusten a ayudar a los países en desarrollo y crear capacidad en sus comunidades, por ejemplo, a través de la educación, la capacitación y la asistencia con cuestiones de propiedad intelectual. Las inversiones en biotecnología se han hecho principalmente en los países en desarrollo y en productos que ofrecerán beneficios económicos. Este enfoque es natural para el sector privado, pero se necesita un plan más amplio. Los gobiernos y otras organizaciones deberían invertir en investigación y desarrollo en los países en desarrollo y productos que puedan beneficiar a los mismos. A través del mayor conocimiento del contexto social de la biotecnología y de los compromisos para resolver las cuestiones existentes se puede imaginar uno un futuro en el que la biotecnología se aproveche de modo responsable para ayudar a todas las naciones y a todas las personas. ■

Las opiniones expresadas en este artículo no reflejan necesariamente los puntos de vista ni las políticas del gobierno de Estados Unidos.

UNA REACCIÓN QUÍMICA PARA LA BIOTECNOLOGÍA: EL PREMIO NOBEL DE 2005

Cheryl Pellerin

Una reacción química con gran potencial comercial en las industrias farmacéutica, biotecnológica y de la alimentación atrajo este año la atención de la Real Academia Sueca de Ciencias. La academia otorgó el Premio Nobel de Química de 2005 a tres científicos - los estadounidenses Robert Grubbs y Richard Schrock, y el francés Yves Chauvin - por el descubrimiento de una reacción que simplifica el desarrollo y la producción industrial de fármacos, plásticos y otros materiales creados con ingeniería biológica de una manera que hace esa producción menos costosa y menos perjudicial para el medio ambiente.

"La metátesis es... un arma importante en la búsqueda de nuevos productos farmacéuticos para tratar las principales enfermedades del mundo", dijo la Real Academia Sueca de Ciencias al anunciar el premio. Agregó que la labor de los ganadores del Premio Nobel ayudará a los investigadores a desarrollar medicamentos biotecnológicos para hacer frente a enfermedades como las infecciones bacterianas, hepatitis C, cáncer, enfermedad de Alzheimer, síndrome de Down, osteoporosis, artritis, inflamación, fibrosis y VIH/SIDA.

La reacción que desarrollaron Grubbs, Schrock y Chauvin se denomina "metátesis de olefinas". La metátesis de olefinas comienza con una cadena de carbono que tiene un doble vínculo de carbono-carbono, por lo general muy difícil de romper. Se agrega un catalizador especial - sustancia que aumenta la tasa de reacción sin ser consumida en el proceso - que tiene un vínculo doble de carbono-metal. Durante la reacción, todos los elementos de la cadena de carbono y el catalizador se unen para formar un solo anillo. El anillo se quiebra posteriormente y un átomo de carbono del vínculo doble de carbono-metal se cambia de lugar con un átomo de carbono del vínculo doble de carbono-carbono. Las dos sustancias resultantes forman un nuevo compuesto químico y un catalizador modificado. La sintetización de este nuevo compuesto en cualquier otro modo habría sido muy complicado y requerido muchos más pasos de reacción.

"El descubrimiento de la metátesis supuso hallar maneras de romper los vínculos [carbono-carbono] y rehaceros muy fácilmente bajo condiciones muy discretas", según Charles Casey, catedrático de química de la Universidad de Wisconsin y anterior presidente de la Sociedad de Química de Estados Unidos.

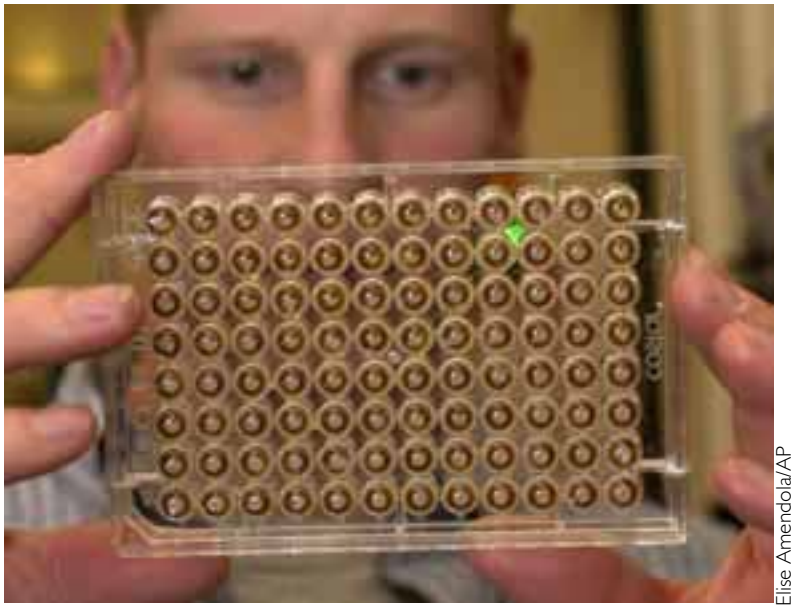
Muchas empresas industriales de biotecnología emplean la metátesis de olefinas para producir candidatos para fármacos y otros compuestos. La metátesis también puede utilizarse para sintetizar sustancias que ocurren naturalmente, como la hormona de un insecto, y producirlas en grandes cantidades para emplearlas como plaguicidas naturales.

"Existen toda clase de moléculas orgánicas complejas que nos encantaría sintetizar" agregó Casey, "y estas [reacciones de metátesis] constituyen algunas de las maneras más eficaces para hacerlo", dijo Casey. ■

Cheryl Pellerin es redactora de temas científicos del Departamento de Estado.

EL PODER DE TRANSFORMACIÓN DE LA BIOTECNOLOGÍA MÉDICA

Bill Snyder



Elise Amendola/AP

Preparación de muestras de ADN purificado para el estudio de su secuencia; Proyecto del genoma humano.

Desde los primeros experimentos de corte y empalme de genes, que dieron lugar al nacimiento de la industria de la biotecnología, se han conseguido adelantos impresionantes. Nuevos medicamentos y vacunas, descubrimientos más importantes y acelerados de medicamentos, mejores medios de diagnóstico y otras aplicaciones médicas, dan testimonio de ello. No obstante, para muchos científicos, los adelantos conseguidos hasta ahora no son más que un primer paso. Creen que, en un futuro no muy distante, el perfeccionamiento de las "terapias focalizadas", dirigidas a las causas biológicas subyacentes de la enfermedad, debería mejorar radicalmente la seguridad y eficacia de los medicamentos, y el advenimiento de tecnologías predictivas podría dar paso a una nueva era en la prevención de las enfermedades, en particular en algunas de las economías de desarrollo más rápido del mundo. Sin embargo, los riesgos no se pueden pasar por alto, ya que los nuevos acontecimientos y descubrimientos plantean nuevas cuestiones, sobre todo en campos como la terapia genética, la ética de la investigación con células pluripotenciales y el uso de información genómica.

Bill Snyder *es redactor principal de temas científicos del Centro Médico de la Universidad Vanderbilt en Nashville, Tennessee.*

Hace treinta años, más de un centenar de los científicos más destacados del mundo se reunieron en el Asilomar Conference Center, en Pacific Grove, California, para debatir los posibles riesgos de la ingeniería genética. El temor a que la tecnología del ADN (ácido desoxirribonucleico) recombinante pudiera transformar microbios inocuos en peligrosos patógenos humanos, llevó a los científicos a acordar la imposición de una moratoria voluntaria para determinados experimentos.

Las funestas predicciones resultaron injustificadas. Por el contrario, el corte y empalme de genes ha fomentado numerosas revoluciones en medicina, entre ellas: métodos rápidos para detectar una infección o vigilar el grado de colesterol, el descubrimiento de nuevas vacunas y clases totalmente nuevas de productos terapéuticos, y adelantos en el conocimiento de enfermedades tan diversas como la fibrosis quística y el cáncer.

De los primeros experimentos de corte y empalme de genes surgió la dinámica y lucrativa industria de la biotecnología. La recombinación del ADN hizo posible descifrar la secuencia del genoma humano y sentó las bases de los nuevos campos de bioinformática, nanomedicina y terapia individualizada. Muchos científicos creen que en los próximos veinte años, el perfeccionamiento

de las “terapias focalizadas”, dirigidas a las causas biológicas subyacentes de la enfermedad, debería mejorar radicalmente la seguridad y eficacia de los medicamentos, mientras que la invención de tecnologías predictivas, como la proteómica, podría dar paso a una nueva era de prevención de enfermedades.

No obstante, perduran los temores de los riesgos de la terapia genética, la ética de la investigación con células pluripotenciales y el posible uso indebido de la información genómica. Según el punto de vista de cada cual, la biotecnología rezuma promesa o peligro, o una combinación de ambos.

LOS PRIMEROS PASOS

El primer medicamento producto de la bioingeniería, una forma recombinante de insulina humana, fue aprobado por la Administración de Alimentos y Fármacos de Estados Unidos (FDA) en 1982. Hasta entonces, la insulina se obtenía de un suministro limitado de tejido pancreático de vaca o cerdo. Al insertar el gen humano de la insulina en bacterias, los científicos consiguieron la producción bacteriana de grandes cantidades de la proteína salvadora. En el futuro próximo, los pacientes con diabetes podrán inhalar insulina y eliminar, así, la necesidad de las inyecciones.

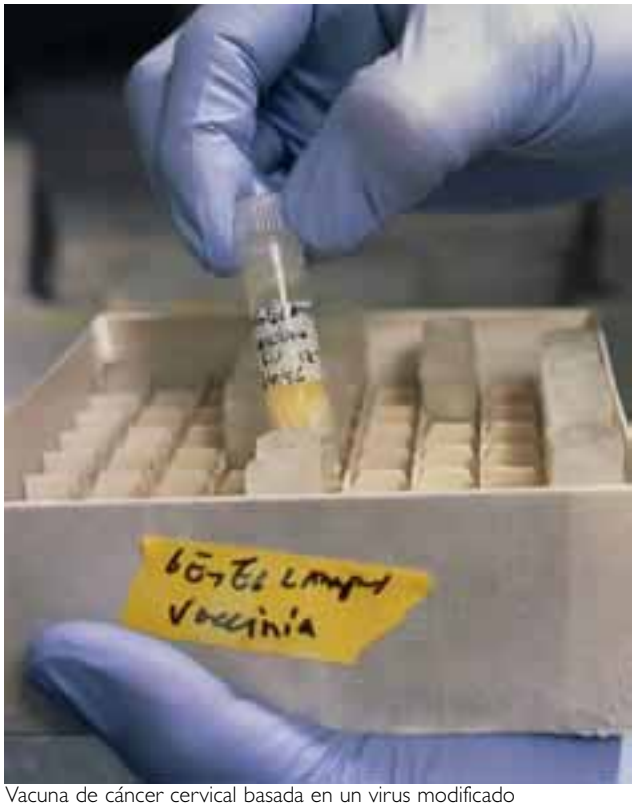
La primera vacuna recombinante, aprobada en 1986, se obtuvo mediante la introducción de un fragmento de gen del virus de hepatitis B en levadura. El fragmento fue convertido por el mecanismo genético de la levadura a un antígeno, una proteína que se encuentra en la superficie del virus que estimula la respuesta inmunitaria. De esta forma se evitó la necesidad de extraer el antígeno del suero de la persona infectada con hepatitis B.

Hoy existen más de 100 medicamentos y vacunas recombinantes. Debido a su eficacia, inocuidad y costo relativamente bajo, las pruebas de diagnóstico molecular y las vacunas recombinantes pueden ser de especial importancia en la lucha contra enfermedades tradicionales de los países en desarrollo, como la leishmaniasis (infección tropical que causa fiebre y lesiones) y la malaria.

MEJORES MEDIOS DE DIAGNÓSTICO

La biotecnología también ha mejorado de manera radical los medios de diagnóstico. La reacción en cadena de la polimerasa, método para ampliar fragmentos minúsculos de ADN, inicialmente descrita a mediados de los ochenta, ha sido decisiva para la invención de análisis de sangre que, entre otras cosas, permiten determinar rápidamente la exposición al virus de inmunodeficiencia humana (VIH).

La creación de anticuerpos monoclonales en 1975 condujo a otra revolución médica similar. El cuerpo produce normalmente una gran variedad de anticuerpos - proteínas del sistema inmunitario - que atacan a los microorganismos y otros invasores extraños. Al fusionar células productoras de anticuerpos con células de mieloma, los científicos consiguieron generar anticuerpos que, cual “balas mágicas”, podían dirigirse a metas determinadas, incluidos marcadores singulares llamados antígenos, en la superficie de las células inflamatorias. Ejemplos iniciales incluyen los anticuerpos monoclonales capaces de impedir al sistema inmunitario rechazar transplantes de órganos, y el tan renombrado Herceptin, aprobado para el tratamiento de cáncer de mama avanzado en 1988. Se han autorizado otros anticuerpos monoclonales



David Parker/Photo Researchers, Inc.

Vacuna de cáncer cervical basada en un virus modificado genéticamente.

para el tratamiento de la esclerosis múltiple y la artritis reumatoide, y actualmente se están usando con carácter experimental en pacientes, como posibles tratamientos del asma, la enfermedad de Crohn y la distrofia muscular.

Marcados con radioisótopos u otros agentes de contraste, los anticuerpos monoclonales pueden ayudar a descubrir la ubicación de células cancerosas, lo que permite asegurar una mayor precisión en la cirugía y la

terapia de radiación y mostrar, en un plazo de 48 horas, si un tumor está respondiendo a la quimioterapia. Las proteínas también pueden descargar una dosis letal de fármacos tóxicos en las células cancerosas, sin dañar los tejidos normales contiguos.

ANIMALES TRANSGÉNICOS

Actualmente es posible realizar pruebas genéticas para muchos trastornos raros, como la hemofilia, que está causada por la mutación de un solo gen. Sin embargo, es poco lo que se puede hacer para evitar o retrasar la marcha de algunas de estas enfermedades, y todavía no se comprenden bien las causas subyacentes de enfermedades complejas como el cáncer, las cardiopatías y las enfermedades mentales.

Esta situación está cambiando gracias, en parte, a la posibilidad, lograda a principios de los años 80, de insertar ADN humano en ratones y otros animales.

Dado que ahora expresan genes humanos, los animales "transgénicos" pueden estudiarse como modelos para el desarrollo de la diabetes, la arteriosclerosis y la enfermedad de Alzheimer. También pueden producir grandes cantidades de proteínas humanas con potencial terapéutico. Por ejemplo, actualmente se están llevando a cabo experimentos en pacientes con un trombolítico recombinante, expresado en la leche de cabras transgénicas.

La secuencia del genoma humano, concluida hace ahora dos años, ha dado a los científicos una abundante "lista de partes", con las que pueden entender mejor por qué y cómo se producen las enfermedades. Ha impulsado el estudio del perfil de la expresión genética, técnica para observar la expresión de miles de genes simultáneamente en una placa de cristal llamada micromatriz. Esta técnica permite predecir, en algunos casos, la agresividad del cáncer de mama.

Otro campo que está adelantando rápidamente es el de la proteómica, que usa tecnologías como la espectrometría de masas para detectar marcadores biológicos proteínicos en la sangre que pueden indicar señales tempranas de enfermedades, incluso antes de que aparezcan los síntomas. Uno de estos marcadores es la proteína C reactiva, indicadora de cambios inflamatorios en las paredes de los vasos sanguíneos, que presagian arteriosclerosis.

Los análisis de alto rendimiento (HTS), mediante refinadas tecnologías robóticas e informáticas, permiten a los científicos analizar decenas de millares de pequeñas moléculas en un solo día, para determinar su capacidad de fusionarse o modular las actividades de un "objetivo", como un receptor para un neurotransmisor en el cerebro. Con ello se pretende mejorar la velocidad y precisión de la obtención de nuevos medicamentos y, al mismo tiempo, reducir el costo y mejorar la inocuidad de los productos farmacéuticos que llegan al mercado.

RESPUESTA A LA RESISTENCIA A LOS ANTIBIÓTICOS

La biotecnología también está resolviendo el apremiante y creciente problema de la resistencia a los antibióticos.

Con ayuda de la bioinformática - poderosos programas de computadora capaces de analizar miles de millones de datos de la secuencia del genoma - los científicos están descifrando los códigos genéticos de las bacterias y descubriendo "puntos débiles" vulnerables al ataque por componentes identificados por técnicas de análisis de alto rendimiento. Este tipo de trabajo condujo en 2000 a la aprobación de Zyvox, el primer antibiótico enteramente nuevo que entró en el mercado en 35 años.

Los bacteriófagos líticos, virus que infectan y matan las bacterias, pueden ser otra forma de contrarresistencia. Usada inicialmente en el tratamiento de infecciones en los años veinte, la "fagoterapia" cayó en el olvido con el advenimiento de los antibióticos. No obstante, a principios de este año, investigadores de la antigua república soviética de Georgia, informaron de que un polímero biodegradable impregnado con bacteriófagos y el antibiótico Cipro curó las heridas infectadas con una bacteria resistente a los antibióticos.

La nanomedicina es otro campo médico que está avanzando rápidamente. Los científicos están elaborando una gran variedad de nanopartículas y nanodispositivos, de apenas una millonésima de pulgada de diámetro, para mejorar la detección del cáncer, fortalecer las respuestas inmunitarias, reparar tejidos dañados y evitar la arteriosclerosis. A principios de este año, la FDA de Estados Unidos aprobó una nanopartícula ligada al medicamento contra el cáncer Taxol, para el tratamiento del cáncer de mama avanzado. En Estados Unidos se está usando con carácter experimental otra nanopartícula en pacientes cardíacos, para mantener abiertas las arterias coronarias después de una operación de angioplastia.

Los estudios de las células madre embrionarias humanas, dirigidos a reemplazar células dañadas por diabetes, cáncer o la enfermedad de Alzheimer, han provocado una acalorada polémica en los Estados Unidos, por el temor de que este tipo de investigación exige la destrucción de vida humana en potencia. No obstante, las investigaciones avanzan rápidamente en laboratorios financiados con fondos privados en Estados Unidos y en todo el mundo.

Lawrence Jackson/AP/WWP

Investigadores de la Universidad de Howard están estableciendo una base de datos genéticos sobre afroamericanos.

LAS DIFICULTADES DE LA TRANSFERENCIA GENÉTICA

Algunos métodos de biotecnología para mejorar la salud han resultado ser más difíciles que otros. Un ejemplo de ello es la transferencia genética o reemplazo de un gen defectuoso por otro que funciona normalmente. En la mayoría de los casos, el gen normal se introduce en los tejidos mediante un adenovirus alterado genéticamente para asegurar su inocuidad.

El primer experimento de transferencia genética, realizado en 1990 en los Institutos Nacionales de Salud (NIH), corrigió felizmente una deficiencia enzimática en una niña de 4 años. Sin embargo, nueve años después, la muerte de otro paciente, aparentemente a causa de una fuerte reacción inmunitaria al virus portador del gen, derivó en la imposición de requisitos de seguridad más estrictos en las pruebas clínicas.

Desde entonces se ha adelantado poco, aunque la transferencia de genes actualmente se está estudiando en pacientes en Estados Unidos y otros países como posible tratamiento de la enfermedad arterial periférica, la enfermedad de Parkinson y algunas formas de cáncer. El gobierno chino ha aprobado recientemente la primera transferencia genética comercial para el tratamiento del cáncer de cabeza y cuello.

Los científicos no creen que podrán encontrar un solo gen para cada enfermedad. Por consiguiente, están estudiando relaciones entre genes y analizando poblaciones en busca de variaciones en el código genético, llamadas polimorfismos nucleótidos únicos, que pueden aumentar el riesgo de una persona a una enfermedad concreta o determinar la reacción de una persona a un medicamento dado.

Esta poderosa capacidad de asignar riesgos y respuestas a las variaciones genéticas está impulsando el movimiento hacia la "medicina individualizada". El objetivo no es más que la prevención, el diagnóstico temprano y una terapia más eficaz, mediante la prescripción de intervenciones que concuerdan con determinadas características genéticas del paciente.

EN BUSCA DE NUEVAS POSIBILIDADES

En respuesta a los temores de que la información sobre el riesgo a enfermedades pueda utilizarse para negar seguro médico o empleo, en los últimos años se ha aprobado en Estados Unidos una serie de leyes estatales y federales por las que se prohíbe la discriminación genética.

Mientras tanto, los NIH, una de las principales fuentes de apoyo a la investigación en Estados Unidos, está instando a las instituciones académicas a emprender el estudio de nuevas ciencias y nuevas posibilidades. Por ejemplo, el Centro Médico de la Universidad Vanderbilt, en Nashville, Tennessee, está revisando su plan estratégico de investigación para dar más relieve a la medicina personalizada, el descubrimiento de medicamentos y la atención de salud de la población -cómo mejorar la prestación de los servicios de salud a las poblaciones.

La investigación de vanguardia "nos acerca a nuestro objetivo último de eliminar la discapacidad y la enfermedad, gracias a la mejor atención que puede prestar la medicina moderna", dice el Dr. Harry R. Jacobson, vicecanciller para asuntos de salud de la Universidad Vanderbilt.

La biotecnología es una herramienta neutra; no obstante, sus posibilidades plantean preocupantes cuestiones éticas. ¿Se debe permitir a los futuros padres "diseñar" las características físicas de sus embriones? ¿Debe la ciencia manipular la línea germinal humana, o alteraría así, de manera profunda e irrevocable, lo que significa ser humano?

En un horizonte más inmediato ¿no deberían los investigadores valerse de la biotecnología, si pueden, para eliminar las desigualdades de salud entre grupos raciales y étnicos? Si bien la variación genética es uno de los numerosos factores que contribuyen a las diferencias en salud (otras son el medio ambiente, la situación socioeconómica, el acceso a la atención de salud, el estrés y el comportamiento), la capacidad creciente para examinar las bases de datos de ADN de diversas poblaciones debería permitir a los científicos analizar el

papel que desempeñan éstos y otros factores.

"El conocimiento de la causas genéticas de las enfermedades cardíacas y el cáncer facilitará el descubrimiento de herramientas de diagnóstico e intervenciones que puedan contribuir a evitar la propagación de estos trastornos devastadores en las economías de más rápido desarrollo del mundo, incluido el Oriente lejano", afirma el Dr. Jeffrey R. Balser, vicecanciller adjunto para investigación de la Universidad Vanderbilt.

La biotecnología por sí sola no puede resolver complejos problemas de salud. Es necesario establecer infraestructuras de atención de salud para garantizar el acceso a nuevas pruebas de diagnóstico, vacunas y medicamentos, y también se tienen que derribar barreras culturales, económicas y políticas que se oponen al cambio. La investigación debe incluir a más miembros de grupos desfavorecidos, lo que exigirá superar temores que algunos de ellos han abrigado por largo tiempo respecto a la ciencia médica.

"También será esencial velar por que los nuevos conocimientos y tecnologías no se usen para discriminar indebidamente a individuos y grupos", declara la Dra. Ellen Wright Clayton, codirectora del Vanderbilt Center for Biomedical Ethics and Society. "Las leyes que se han aprobado son un paso adelante, pero todavía queda mucho por hacer para asegurar la clase de sociedad inclusiva y saludable a la que aspiramos". ■

Las opiniones expresadas en este artículo no reflejan necesariamente los puntos de vista ni las políticas del gobierno de Estados Unidos.

LA CARRERA CONTRA EL DOPAJE GENÉTICO

Huntington F. Willard

En los últimos años, el debate público en torno al uso de sustancias que mejoran el rendimiento en los deportes se ha puesto al rojo vivo. Después de haber jurado ante el Congreso de Estados Unidos, en marzo de 2005, no haber usado nunca esteroides, el jugador de béisbol de los Orioles de Baltimore, Rafael Palmeiro, de cuyo ingreso en el Salón de la Fama nadie dudaba en otro tiempo, fue suspendido por 10 partidos en agosto. ¿Su transgresión? Una prueba positiva de esteroides. Testimonios anteriores ante el gran jurado en la investigación de un laboratorio de San Francisco, filtrados a la prensa, parecían implicar a otras estrellas famosas de los deportes de pelota y atletismo en el uso de esteroides. En otros sectores, los funcionarios encargados de combatir el uso de las sustancias dopantes someten a análisis clínicos periódicos a los ciclistas que participan en competiciones y sancionan a los que dan positivo en el uso de sustancias. Una prueba retrospectiva de 70 muestras de orina de la Vuelta a Francia de 1998 reveló 40 positivas por eritropoyetina (EPO), hormona que promueve la formación de glóbulos rojos y puede aumentar la resistencia. En 1998 no existían análisis fiables para detectar el uso de EPO.

Roberto Borea/AP/WWP

El jugador de béisbol Rafael Palmeiro se agacha para recoger una pelota.

Con todos los recientes titulares sobre el uso de esteroides anabólicos por jugadores de fútbol americano y de hormonas sintéticas en el ciclismo europeo, el dopaje genético de alta tecnología puede muy bien tener pronto el dudoso honor de dejarlos anticuados. El comisionado de la Liga nacional de fútbol Paul Tagliabue, en una comparecencia ante el Congreso, apenas un mes después de que Palmeiro declarase no haber usado jamás esteroides, lo dijo claramente: "Cuando [el dopaje genético] sea una realidad, las cuestiones de [dopaje] que nuestra sociedad está debatiendo hoy... serán tan carentes de actualidad como el herrero en la era del automóvil".

El dopaje genético, o uso no terapéutico de ADN y células para mejorar el rendimiento atlético, tiene la posibilidad de ofrecer al tramposo que las use un cuerpo supercargado, capaz de correr con más rapidez y saltar a más altura, pero cuyas modificaciones son prácticamente imposibles de detectar. Si un atleta se inyecta copias adicionales de un gen ya presente en su cuerpo, ¿cómo se va a poder distinguir el original de la copia? Sólo una biopsia muscular, invasiva y costosa, podría detectar la presencia de un gen sintético ligeramente modificado.

Sabemos que una proporción de nuestra proeza física está inscrita en nuestro genoma. Un estudio reciente de hombres adultos jóvenes que se estaban entrenando para carreras de ciclismo indicó que hasta un total de 500 genes y marcadores de ADN dispersos por el genoma podrían estar relacionados con el rendimiento atlético y el buen estado físico. Por ejemplo, los ratones que carecen del gen de la miostatina tienden a desarrollar una enorme musculatura, resultado del mayor número y tamaño de las fibras musculosas. A

estos roedores se les ha dado el nombre de "ratones Schwarzenegger". ¿Cuántos culturistas podrían resistir esa tentación?

Al igual que con otros métodos de dopaje, las cuestiones de seguridad sobre el dopaje genético deberían bastar para dar que pensar a los atletas. El uso indebido de EPO, por ejemplo, puede tener consecuencias devastadoras. La EPO puede espesar la sangre hasta tal punto que llegue a provocar el fallo cardíaco, en particular en los atletas de primera fila, cuyo ritmo cardíaco en descanso tiende a ser extraordinariamente lento. No mucho después de que EPO hiciera su aparición en el ciclismo, 18 ciclistas belgas y holandeses murieron repentinamente de ataque al corazón. Por tanto, cabe preguntarse ¿cuál será el riesgo del dopaje genético de EPO, una vez que el gen de la EPO se pueda administrar sin temor a ser detectado?

Michel Spingler/AP/WWP

Ciclistas por las calles de París, en una carrera de la Vuelta a Francia.

Hay quienes dicen que la mejor forma de controlar el dopaje genético es la legalización. Después de todo, aducen, si Tiger Woods puede mejorar su visión a 20/10 con cirugía láser y, de esta forma, jugar mejor al golf, ¿por qué no podría un ciclista modificar sus genes? Además, añaden, al legalizar y reglamentar el dopaje genético, se pueden imponer normas de seguridad.

Pero ¿violaría el dopaje genético el espíritu del deporte? Hasta ahora, la respuesta oficial es afirmativa. En los últimos años, tanto el Comité Olímpico Internacional como la Agencia Mundial Antidopaje han añadido el dopaje genético a su lista de sustancias prohibidas (la Unión Internacional de Ciclistas ha mantenido un mutismo sorprendente respecto al tema). Todavía queda por ver si se puede hallar un medio práctico de hacer respetar estas prohibiciones. En nuestra cultura competitiva, el deseo de ganar está siempre presente. A principios de 2005, después de que las grandes ligas de béisbol de Estados Unidos se vieran obligadas, por vergüenza, a imponer un régimen algo más estricto de análisis para la detección de esteroides, la Oficina del Comisionado de Béisbol hizo públicos los nombres de 41 jugadores de la liga menor que habían dado positivo en las pruebas de dopaje del entrenamiento de primavera. Sorprendentemente, estos jugadores habían continuado usando sustancias prohibidas, aunque sabían que probablemente tendrían que someterse a pruebas, serían descubiertos y su identidad sería revelada públicamente. ¿Y qué decir de Palmeiro? Si tomó esteroides deliberadamente, ¿podría no haber sabido que, si fuera descubierto, de héroe pasaría instantáneamente a ser paria?

El dopaje convencional puede muy bien, como el herrero, convertirse en cosa del pasado, pero parece haber escasas dudas de que el dopaje genético pronto estará entre nosotros. ¿Que significará eso para nuestros juegos? ■

Huntington F. Willard es director del Instituto de Ciencias y Política del Genoma de la Universidad Duke y vicecanciller para las ciencias del genoma del Centro Médico de la Universidad Duke, en Durham, Carolina del Norte.

Las opiniones expresadas en este artículo no reflejan necesariamente los puntos de vista ni las políticas del gobierno de Estados Unidos.

BIOTECNOLOGÍA VEGETAL: Adelantos en alimentación, energía y salud

Richard Hamilton, Richard B. Flavell y Robert B. Goldberg

El mundo necesitará producir más alimentos, pienso y fibra durante los próximos 50 años que en toda la historia de la humanidad. La revolución tecnológica provocada por la genómica brinda una oportunidad única de alcanzar esa meta. Las plantas resistentes a los insectos y los herbicidas producto de la ingeniería genética están rindiendo importantes beneficios a través de alimentos, piensos y fibras más asequibles, que requieren menos plaguicidas, conservan más suelo y permiten la existencia de un medio ambiente más sostenible. Y en un mentís a las críticas, las plantas derivadas de la biotecnología han demostrado ser tan inocuas, o más, que las producidas por métodos convencionales. En el futuro, los adelantos en biotecnología agrícola darán por resultado plantas más resistentes a la sequía, al calor y al frío; plantas que exigirán menos aplicaciones de fertilizantes y plaguicidas, producirán vacunas para evitar enfermedades contagiosas graves y tendrán otras características deseables.

Richard Hamilton *y* ***Richard B. Flavell*** *son, respectivamente, director ejecutivo y director científico de Ceres, Inc., compañía privada de biotecnología.* **Robert B. Goldberg** *es catedrático de biología molecular, celular y de desarrollo de la Universidad de California, Los Ángeles.*

Las plantas y la agricultura han desempeñado un importante papel en el desarrollo y adelanto de la civilización. Las plantas proporcionan suministros sostenibles de alimentos para los seres humanos, pienso para los animales, fibra para la construcción y la ropa, medicinas y fármacos, perfumes, productos químicos para procesos industriales, energía para cocinar y calentar y, en fechas más recientes, biomasa para atender a la creciente demanda de combustibles para el transporte. Las plantas también desempeñan una importante función ambiental al evitar la erosión del suelo, aumentar la concentración de oxígeno en la atmósfera, reducir las emisiones de dióxido de carbono de la combustión de combustibles fósiles y enriquecer el suelo con nitrógeno, que reciclan entre el suelo y la atmósfera.

LA AGRICULTURA EN EL SIGLO XXI

De confirmarse las predicciones sobre el crecimiento de población, necesitaremos producir más alimentos, pienso y fibra en los próximos 50 años que en toda la historia de la humanidad. Y tendremos que hacerlo en una superficie de terreno apta para la agricultura y la producción de plantas cada vez más reducida.

Esto plantea importantes desafíos para la agricultura del siglo XXI:

• El rendimiento de las cosechas tiene que superar las espectaculares mejoras conseguidas en el siglo XX para atender a la creciente demanda y ahorrar espacio abierto.

• Los insumos necesarios para la agricultura intensiva, como agua y fertilizantes, tienen que reducirse.

• Es necesario obtener cosechas que prosperen en condiciones inhóspitas, a fin de poder utilizar suelos poco fértiles para cultivar importantes cosechas, prolongar las temporadas agrícolas y asegurar que el rendimiento no merme a causa de la sequía, el calor, el frío y otras inclemencias.

• El efecto ambiental de la agricultura debido al uso de plaguicidas, herbicidas y fertilizantes tiene que disminuir. Por ejemplo, mediante ingeniería genética se tienen que obtener plantas resistentes a las plagas, capaces de absorber con más eficacia los nutrientes del suelo y competir con éxito con las malas hierbas por el agua y la luz.

• Los cultivos alimentarios tienen que ser perfeccionadas al máximo para mejorar la salud y nutrición humanas, al proporcionar vitaminas, aminoácidos y proteínas esenciales que ayuden a eliminar la malnutrición y las enfermedades.

• Es preciso obtener nuevos cultivos para fines energéticos, de alto rendimiento, que se puedan usar como fuente renovable de biomasa para combustibles, con objeto de limitar nuestra dependencia de un sistema energético basado en el petróleo.

• Necesitamos "volver al futuro" y obtener por técnicas de ingeniería botánica plantas especiales, capaces de funcionar como fábricas de productos químicos y proteínas para fines médicos e industriales, por ejemplo, precursores

plásticos y vacunas para combatir patógenos humanos y animales.

Estos desafíos exigirán el uso de las técnicas moleculares y fitogenéticas más avanzadas actualmente disponibles, así como la creación de otras nuevas. Ningún tiempo pasado ha sido tan estimulante para la biología vegetal y la agricultura, y la revolución tecnológica creada por la era genómica brinda una oportunidad única de alcanzar estas metas en el curso de los próximos veinte años, si no antes.

EL USO DE LA BIOTECNOLOGÍA PARA OBTENER NUEVOS CULTIVOS

La mayor parte de las plantas que cultivamos actualmente no proceden de un jardín del Edén mítico, ni crecen de manera "natural". Al contrario, la mayor parte de los cultivos importantes fueron modificados por nuestros antepasados hace miles de años, a partir de especies silvestres, mediante selección y mejora, para dotarlos de características más favorables para el consumo humano. Estos ingenieros genéticos primitivos aprendieron a reconocer las mutaciones casuales que aparecían en las poblaciones de plantas silvestres y a usar esta variabilidad genética para obtener las plantas alimentarias que consumimos hoy. Por ejemplo, el maíz se obtuvo de la gramínea teocinte hace 10.000 años, mediante la selección de unos pocos genes que controlan el tamaño de la mazorca, la estructura y el número de los granos y la arquitectura de la planta. Casi todas las plantas que consumimos hoy, como trigo, soja, arroz, patata, repollo, brécol y tomate, fueron modificadas de manera similar, es decir, mediante tecnologías genéticas, para crear nuevas combinaciones de genes en una especie de planta y seleccionar después las mejores características en la progenie.

Las principales innovaciones que están transformando la agricultura son tecnologías de ingeniería genética que permiten aislar genes nuevos, manipularlos y volver a insertarlos en plantas; la posibilidad de regenerar casi cualquier especie de planta del cultivo de tejidos en una planta fértil; y la invención de tecnologías genómicas de alto rendimiento. Estas últimas permiten trazar el mapa y descifrar la secuencia de genomas enteros de plantas e identificar los genes que controlan todos los procesos vegetales, incluidos los que pueden contribuir a solucionar los desafíos de la agricultura en el futuro, como genes para la resistencia a las enfermedades o a la sequía, número y tamaño de los granos.

En el plano genético, el cultivo tradicional de plantas depende de la introducción de mutaciones al azar, o variabilidad genética, en el genoma de una planta y después

Volker Steger/Peter Arnold, Inc.

Tomates resistentes al moho, obtenidos por ingeniería genética, y tomates ordinarios.

seleccionar, de una gran población, el pequeño grupo de cambios que da por resultado un cambio positivo. En la gran mayoría de los casos, los cambios genéticos que se producen son desconocidos. En cambio, la ingeniería genética es una solución más precisa y, debido a ello, se puede usar para obtener nuevas y valiosas características en una pequeña fracción del tiempo necesario para seguir las técnicas relativamente imprecisas del cultivo tradicional. Los genes que se han caracterizado ampliamente se pueden introducir en plantas de cultivo de una forma precisa y dirigida para generar nuevas plantas, mejoradas genéticamente, con características que no se podrían lograr con los métodos clásicos de cultivo.

EL CRECIMIENTO Y LAS VENTAJAS DE LAS PLANTAS BIOTECNOLÓGICAS

Las primeras plantas obtenidas por ingeniería genética a principios de los años ochenta eran resistentes a los herbicidas y a los insectos. Hoy, estas dos características, resistencia a los herbicidas y a los insectos, dan cuenta de la mayoría de las plantas biotecnológicas. Durante los últimos 20 años se ha desplegado un esfuerzo mundial para aislar los genes que proporcionen una larga lista de características señaladas por fitogenetistas, agricultores, consumidores y empresarios para mejorar una variedad de plantas. La biotecnología vegetal y la ingeniería genética son hoy día actividades importantes de los sectores público y privado y están pasando a ser parte importante de la fitogenética de todos los continentes. De hecho, ningún tiempo pasado ha sido tan estimulante para la agricultura, porque las poderosas tecnologías del genoma permiten identificar genes que pueden revolucionar la producción de plantas en el curso de los próximos 50 años.

En 2005 celebramos 10 años de cultivo de plantas

Betsy Blaney/AP/WWP

Campo de algodón.

biotecnológicas. Durante ese período se han cultivado 400 millones de hectáreas de plantas biotecnológicas mejoradas genéticamente. Las plantas biotecnológicas han sido adoptadas por agricultores de todo el mundo a un ritmo más rápido que cualquier otra variedad de plantas en la historia de la agricultura, incluido el maíz híbrido de alto rendimiento el siglo pasado. Desde su introducción en 1996, el uso de plantas biotecnológicas mejoradas genéticamente ha aumentado a un ritmo de más de 10 por ciento al año, y en 2004, según datos del Servicio Internacional para la Adquisición de Aplicaciones Agrobiotecnológicas, aumentó 20 por ciento. Las principales plantas portadoras de nuevos genes biotecnológicos son la soja, el maíz, el algodón y la canola, que representan, respectivamente, 56 por ciento, 14 por ciento, 28 por ciento y 19 por ciento de la superficie mundial dedicada a estos cultivos. Juntos, ocupan cerca de 30 por ciento de la superficie mundial dedicada a estos cultivos. En Estados Unidos, la soja biotecnológica (resistente a los herbicidas), el maíz (resistente a los herbicidas y a los insectos) y el algodón (resistente a los herbicidas y a los insectos) representan, aproximadamente, 85 por ciento, 75 por ciento y 45 por ciento, respectivamente, de la superficie total dedicada a estos cultivos.

Estados Unidos es el principal productor de plantas biotecnológicas, con más de 48 millones de hectáreas, seguido de Argentina (16 millones de hectáreas), Canadá (6 millones de hectáreas), Brasil (4,8 millones de hectáreas) y China (4 millones de hectáreas). El valor de los cultivos biotecnológicos es de cerca de 5.000 millones de dólares, lo que supone 15 por ciento y 16 por ciento de la producción mundial de plantas y de mercados de semillas, respectivamente. Los cultivos biotecnológicos están rindiendo importantes beneficios a través de alimentos, piensos y fibras más asequibles, que requieren menos plaguicidas, conservan más suelo y permiten la existencia de un medio ambiente más sostenible. Además, el ingreso anual de los agricultores pobres del mundo en desarrollo ha aumentado considerablemente gracias al uso de plantas biotecnológicas, según datos recientes de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. La mayor parte del valor añadido ha beneficiado a estos agricultores en vez de a los proveedores de la tecnología.

Joerg Boethling

Plantas de arroz modificadas genéticamente.

LOS TEMORES QUE LIMITAN EL CRECIMIENTO DE LOS CULTIVOS BIOTECNOLÓGICAS

Aunque las plantas producidas mediante la biotecnología y la ingeniería genética han sido adoptadas con gran rapidez y son las más estudiadas y analizadas de la historia humana, la biotecnología agrícola no es ajena a la controversia. La oposición al uso de la biotecnología y los organismos de ingeniería genética derivados de ella está limitada en gran parte a Europa, donde un pequeño, pero muy activo, grupo de activistas ha atizado la opinión pública en contra de la tecnología.

En un entorno donde las alarmas alimentarias no relacionadas con la biotecnología, por la enfermedad de las vacas locas y la dioxina, han erosionado la confianza pública de los europeos en el control fiscalizador de su

Scott Olson/Getty Images

Varios maíces híbridos se cultivan para la producción de etanol.

suministro alimentario, los grupos activistas han podido generar considerable desconfianza de la biotecnología agrícola. Esta desconfianza es injustificada: los temores hipotéticos no se han confirmado después de más de 10 años de uso inocuo y más de 400 millones de hectáreas plantadas con variedades mejoradas genéticamente. No se conocen casos de efectos adversos de estas cosechas en seres humanos y existen beneficios ambientales demostrables. De hecho, estudios importantes publicados en revistas revisadas por científicos expertos en la materia, en el curso de los últimos cinco años, indican que las plantas biotecnológicas son considerablemente equivalentes a sus semejantes no biotecnológicas, que los rendimientos han aumentado, que las aplicaciones de plaguicidas han disminuido, que grandes cantidades de suelo se han conservado y que las prácticas de gestión han conseguido evitar o reducir al mínimo la resistencia a las plantas resistentes a los insectos. Aunque ninguna tecnología está completamente exenta de riesgo, las plantas biotecnológicas han demostrado ser tan inocuas, o más, que las producidas por métodos convencionales.

¿QUÉ NOS TRAERÁ EL FUTURO?

Los próximos diez años, los adelantos en biotecnología agrícola darán por resultado plantas más resistentes a la sequía, al calor y al frío; plantas que exigirán menos aplicaciones de fertilizantes y plaguicidas, producirán vacunas para prevenir enfermedades contagiosas importantes, tendrán más semillas y de mayor tamaño, más contenido nutritivo y podrán regenerarse sin necesidad de fertilización, fijando el vigor híbrido. También se producirán plantas de mayor valor nutritivo para contribuir a aliviar la malnutrición en el mundo en desarrollo. Actualmente, las plantas de la variedad de "arroz dorado 2", que están siendo sometidas a pruebas en el campo, pueden producir hasta 30 microgramos de beta caroteno, precursor de la vitamina A, según un reciente artículo de Jacqueline Paine y otros. Los autores calculan que esta cantidad de beta caroteno proporcionaría, al menos, 50 por ciento de la dosis diaria recomendada de vitamina A en una porción normal para niños, de 60 gramos.

Además de aumentar la producción de alimentos, piensos y fibra, la biotecnología está haciendo una importante contribución al sector energético. Los adelantos en biotecnología han hecho posible la producción de grandes cantidades de celulasas de bajo costo, que se pueden utilizar para convertir la celulosa en azúcares simples que, a su vez, se pueden transformar, mediante fermentación, en combustibles como el etanol. Recientes cálculos del Departamento de Energía de Estados Unidos indican que, para 2020, Estados Unidos podría obtener de biomasas 30 por ciento o más de sus combustibles para el transporte. La biotecnología agrícola puede incrementar esa cifra mejorando la densidad del rendimiento de la biomasa, perfeccionando las características de la elaboración de los piensos de biomasa y reduciendo la necesidad de insumos agronómicos tales como agua, fertilizantes y plaguicidas.

Varios países claves, en particular Estados Unidos y China, están fomentando la biotecnología agrícola, haciendo las inversiones necesarias en investigación y desarrollo y ofreciendo un sistema normativo viable para la introducción y comercialización de nuevas plantas mejoradas por medios biotecnológicos.

Si vamos a crear una nueva modalidad de agricultura en el siglo XXI, que sea sostenible y rentable con respecto a la seguridad alimentaria y la autosuficiencia energética, tendremos que emplear todas las herramientas científicas y los descubrimientos a nuestra disposición, incluidas la biotecnología y la ingeniería genética, y seguir el camino continuo de los adelantos agrícolas que han permitido a la humanidad progresar durante miles de años. ■

Las opiniones expresadas en este artículo no reflejan necesariamente los puntos de vista ni las políticas del gobierno de Estados Unidos.

LOS INSECTOS BIOTECNOLÓGICOS

AP/WWP/USDA

Después de las curas milagro y los alimentos milagro, los insectos modificados genéticamente (MG) están dando mucho que hablar en los círculos científicos como el posible próximo "milagro" de la biotecnología. La feliz aplicación de insectos MG podría mejorar de manera radical la salud pública, en particular en los países en desarrollo, aumentar la producción agrícola y mejorar el medio ambiente natural, según algunos científicos. También podría hacernos pensar dos veces antes de matar a un mosquito que se ha nos ha posado en el cuello, porque podría estar combatiendo una enfermedad en lugar de transmitirla.

Dos tipos de insectos MG son actualmente objeto de investigación paratransgénica y transgénica. Los insectos paratransgénicos se crean mediante la integración de un fragmento de ADN manipulado en el laboratorio (conocido como el transgén) en los microbios que habitan normalmente su canal alimentario. Los genes expresados en estos microbios pueden alterar las características del insecto anfitrión. Los insectos transgénicos son el producto de la integración física de transgenes en los cromosomas de un insecto.

La alteración genética de un insecto para que toda su progenie quede también alterada genéticamente exige que la integración inicial del transgén ocurra en los cromosomas de células productoras de esperma o huevos (la mayor parte de los insectos se reproducen sexualmente). Los insectos MG necesitan tener características fácilmente visibles para que los científicos u otros interesados puedan controlarlos durante la investigación, por ejemplo, para separar los machos de las hembras.

Los científicos están trabajando para producir una gran variedad de insectos dotados de características nuevas que les permitan combatir con éxito la propagación de enfermedades contagiosas, controlar hierbas y plagas dañinas, y elaborar productos farmacéuticos. Por ejemplo, se puede alterar genéticamente a las abejas para hacerlas resistentes a enfermedades y parásitos, y los gusanos de seda modificados genéticamente pueden producir proteínas industriales para su uso en la creación de nuevos materiales.

No obstante, por productivas que puedan ser estas abejas y estos gusanos de seda, el verdadero interés radica en los insectos MG que puedan salvar vidas. Los mosquitos propagan la malaria, que infecta de 300 a 500 millones de personas y mata a más de un millón al año, según la Organización Mundial de la Salud. Los plaguicidas químicos actualmente en uso repercuten de manera adversa en la salud humana y el medio ambiente, y la aparición de insectos resistentes a muchos plaguicidas ha comprometido la eficacia de estos productos.

Los mosquitos MG encierran la promesa de una solución limpia y radical al problema de la malaria. Los científicos quieren modificar genéticamente insectos machos, que pueden después ser criados, esterilizados y puestos en libertad para que se apareen con las hembras. Esta reproducción truncada conduciría a la erradicación, o al menos a una reducción radical, de la población natural de mosquitos.

Otro método sería infiltrar genes de resistencia a la malaria en la población actual de estos insectos. Esta infiltración, de efectuarse con una frecuencia suficientemente alta, podría reducir la transmisión de la enfermedad, según Anthony James, profesor de biología y bioquímica de la Universidad de California, en Irvine.

Ya se han llevado a cabo las primeras pruebas confinadas en el terreno con distintos insectos MG, y se espera que algunos proyectos alcancen la fase de liberación total en el medio ambiente en un plazo de tres a cinco años. Pero no se prevé la liberación de enjambres de insectos MG en el futuro próximo. Los obstáculos tecnológicos y de otra índole impedirán a los científicos y a los comerciantes iniciar liberaciones de insectos transgénicos en gran escala antes de que transcurran, al menos, cinco o 10 años, según Luke Alphey, del Departamento de Zoología de la Universidad de Oxford.

Los científicos y las autoridades reguladoras también tienen que hacer frente a las incertidumbres de los efectos duraderos que esos insectos pudieran tener en los ecosistemas, la salud pública y la seguridad de los alimentos. Además, el hecho de que los insectos no respetan fronteras plantea problemas reglamentarios internacionales que el mundo nunca ha conocido con plantas MG. Estados Unidos y otros muchos gobiernos todavía no tienen políticas integrales sobre cómo abordar la cuestión de los insectos transgénicos, y las organizaciones internacionales no participan todavía en el proceso regulador pertinente. En consecuencia, en un informe de 2004 de la Pew Initiative on Food and Biotechnology (Iniciativa Pew sobre Alimentos y Biotecnología) se llega a la conclusión de que la investigación amenaza con adelantarse a la elaboración de reglamentaciones. El informe dice que si las autoridades normativas y los científicos quieren disponer de una serie de normas claras antes de que estén listos los programas para llevar a cabo las pruebas no confinadas en el terreno, tienen que empezar las discusiones ahora. ■

Fuente: Adaptado de materiales producidos por la Pew Initiative on Food and Biotechnology, incluidos documentos de las conferencias de septiembre de 2004 sobre insectos biotecnológicos.

EL DISEÑO DE NUEVOS MATERIALES Y MÁQUINAS MOLECULARES

Shuguang Zhang

Al imitar a la naturaleza, los científicos están diseñando modalidades moleculares totalmente nuevas, que pueden servir de modelo para nuevos materiales y máquinas moleculares avanzadas. En el incipiente campo de la nanotecnología, se utilizan elementos básicos naturales como los aminoácidos para crear estructuras como péptidos y proteínas, para su aplicación en los campos de la medicina y la energía. Los nanobiotecnólogos han comenzado a aprovechar el autoensamblaje molecular para elaborar nuevas nanobioestructuras como los nanotubos para la fundición de metales, las nanovesículas para encapsular medicamentos y los armazones de nanofibras para el cultivo de tejidos nuevos. Han construido también un fotosistema en nanoescala, de densidad extremadamente alta, y máquinas moleculares ultralivianas para capturar la energía solar. Con mejores conocimientos de estos fenómenos, aparentemente inabordables, la humanidad podrá usar algún día nanodispositivos para reparar órganos del cuerpo o rejuvenecer la piel, mejorar las capacidades humanas, aprovechar la ilimitada energía solar y lograr otras proezas que hoy parecen imposibles.

***Shuguang Zhang** es director adjunto del Centro de Ingeniería Biomédica del Massachusetts Institute of Technology.*

Hace unos 10.000 años, el hombre empezó a domesticar plantas y animales. Ha llegado la hora de domesticar las moléculas.

. — Instituto Whitehead de Investigación Biomédica, Massachusetts Institute of Technology

La biotecnología, conocida principalmente por sus aplicaciones en la medicina y la agricultura, se centra cada vez más en la elaboración de nuevos materiales y máquinas biológicas con diversas estructuras, funciones y usos. El advenimiento de la nanotecnología ha acelerado esta tendencia. Gracias a la pauta que ofrece la naturaleza, que durante miles de millones de años ha pulido y dado forma a los distintos motivos arquitectónicos moleculares, que llevan a cabo numerosas tareas concretas, los nanobiotecnólogos diseñan hoy, poco a poco y de abajo a arriba, modalidades moleculares completamente nuevas que conforman materiales nuevos y máquinas moleculares avanzadas. En la próxima generación, adelantos como los nuevos materiales para reparar tejidos dañados y las máquinas moleculares que aprovechan la energía solar a partir de los aminoácidos y lípidos más diminutos, tendrán seguramente enorme impacto en nuestra sociedad y en la economía mundial.

La biotecnología moderna ha producido una amplia gama de productos útiles como la insulina humana y las nuevas vacunas. Pero lo que queda por delante puede ser aún más revolucionario. Por ese motivo, los gobiernos, tanto grandes como pequeños, y las industrias, tanto locales como mundiales, procuran cada vez más atraer talento e inversión al campo de la biotecnología. No cabe duda de que con la ayuda de las herramientas de la nanotecnología, la biotecnología se expande a un ritmo acelerado y que lo mejor está todavía por llegar.

IMITACIÓN DE LA NATURALEZA

La propia naturaleza es la maestra experta en lo que se refiere a elaborar, átomo por átomo y molécula por molécula, extraordinarios materiales y máquinas moleculares. Las conchas, las perlas, el coral, los huesos, los dientes, la madera, la seda, el cuerno, el colágeno, las fibras musculares y las matrices extracelulares son apenas unos pocos ejemplos de materiales naturales. Los conjuntos macromoleculares multifuncionales, como la hemoglobina, las polimerasas y los canales de membrana son esencialmente máquinas moleculares de exquisito diseño.

A través de miles de millones de años de selección y evolución moleculares, la naturaleza ha producido un conjunto básico de elementos básicos moleculares que incluye a 20 aminoácidos, unos cuantos nucleótidos - unidades estructurales de ácidos nucleicos como el ácido ribonucleico (RNA) y el ácido desoxirribonucleico (ADN) -, una docena aproximada de moléculas lípidas, y dos docenas de azúcares. A partir de estos elementos básicos aparentemente simples, los procesos naturales son

capaces de dar forma a una gama enormemente variada de unidades que pueden a su vez organizarse en estructuras, materiales y máquinas moleculares avanzadas que no sólo presentan una alta precisión, flexibilidad y capacidad de autocorrección, sino que son también autosustentables y pueden evolucionar. Por ejemplo, los sistemas de fotosíntesis de algunas bacterias y todas las plantas verdes toman la luz solar y la convierten en energía química. Cuando hay menos luz solar, como ocurre, por ejemplo, en aguas profundas, los sistemas de fotosíntesis deben evolucionar para llegar a ser más eficientes en su captación de la luz solar.

A principios de la década de los noventa, los biotecnólogos comenzaron a aprender a manipular los elementos básicos naturales que tenían por lo menos una dimensión de entre un nanómetro (la milmillonésima parte de un metro) y 100 nanómetros, para fabricar estructuras moleculares nuevas, lo que introdujo la ciencia y la tecnología en la era del diseño de materiales moleculares. Al igual que la arcilla y el agua se pueden combinar para fabricar ladrillos de múltiples usos que, a su vez, pueden utilizarse para construir paredes como la Gran Muralla

CGhim Wei Ho/Mark Welland, Nanostructure Center, Universidad de Cambridge

Nanomaterial tridimensional formado a partir de minúsculas gotitas de metal líquido sobre una superficie de silicio.

china, casas o caminos, los elementos básicos naturales como los aminoácidos pueden emplearse para crear estructuras como los péptidos y las proteínas, que pueden emplearse para una variedad de propósitos. Por ejemplo, los animales echan pelo o lana para mantenerse calientes, algunos mariscos fabrican conchas para proteger sus tejidos de las lesiones, las arañas hilan telarañas para capturar insectos y nuestras células elaboran una enorme cantidad de colágenos para mantener unidas a las células a fin de formar tejidos y órganos.

Si reducimos las unidades de construcción mil millones de veces hasta llegar a la nanoescala, podemos construir materiales y máquinas moleculares a partir de unidades prefabricadas, de forma similar al ensamblado de una casa prefabricada.

Los péptidos elaborados a partir de aminoácidos son unidades arquitectónicas moleculares que han resultado ser muy útiles para desarrollar nuevos materiales nanobiológicos. En el agua y en los fluidos corporales, estos péptidos forman armazones bien ordenados de nanofibras, útiles para el crecimiento de tejido tridimensional y para la medicina regenerativa. Por ejemplo, mediante el uso de armazones biológicos y células, los científicos han fabricado cartílago y huesos artificiales para reemplazar tejidos dañados. Aún más, han demostrado también que las nanofibras péptidas de autoensamblaje de diseño pueden detener de inmediato la hemorragia, característica útil para las intervenciones quirúrgicas. Los nuevos péptidos han resultado sorprendentemente útiles en la administración de medicamentos, proteínas y genes, porque pueden encapsular ciertos fármacos insolubles y llevarlos hasta las células y otras zonas del cuerpo. Son también esenciales para en la elaboración de máquinas moleculares biosolares de recolección de energía, que utilizan el fotosistema de la espinaca o de las hojas de árboles.

AUTOENSAMBLAJE MOLECULAR

Todas las moléculas biológicas, incluidos los péptidos y las proteínas, se relacionan entre sí y se auto-organizan naturalmente para formar estructuras bien definidas con funciones concretas. Mediante la observación de los procesos a partir de los que se ensamblan estas estructuras en la naturaleza, los nanobiotecnólogos han comenzado a explotar el autoensamblaje en la naturaleza para elaborar nuevas nanobioestructuras como nanotubos para la fundición de metales, nanovesículas para el encapsulado de medicamentos, y armazones de nanofibras para cultivar tejidos nuevos.

El autoensamblaje molecular entraña en su mayoría vínculos débiles - como cuando dos personas se toman de la mano -, que pueden unirse y separarse rápidamente. Esto se diferencia marcadamente de los vínculos sumamente firmes que unen nuestros brazos con nuestro cuerpo. Las interacciones moleculares débiles como el vínculo del hidrógeno o el vínculo iónico desempeñan

individualmente una función indispensable en todas las estructuras biológicas y sus acciones recíprocas. El vínculo del hidrógeno, mediado por el agua, en el cual numerosas moléculas de agua actúan como puente para conectar dos partes separadas, es de especial importancia para los sistemas biológicos, dado que todos los materiales biológicos interactúan con el agua. Dicho vínculo, que se encuentra en todos los colágenos, aumenta la humedad durante un tiempo prolongado.

En su condición de elementos básicos moleculares, los péptidos diseñados se parecen a las piezas de Lego en las que tanto las clavijas como los agujeros han sido dispuestos de una manera determinada y pueden ensamblarse en estructuras bien formadas. Llamados a menudo "péptidos Lego", estos nuevos ladrillos moleculares se ensamblan espontáneamente en nanoestructuras bien formadas en determinadas condiciones ambientales.

En el agua, las moléculas de péptidos Lego se unen para formar nanofibras bien ordenadas que se siguen asociando posteriormente para formar armazones. Un material de armazón de nanofibras que ha sido creado comercialmente es el PuraMatrix, denominado de esta forma debido a su pureza como armazón biológico de diseño biotecnológico. Los investigadores biomédicos lo usan actualmente en todo el mundo para estudiar el cáncer y las células pluripotenciales, así como para reparar tejido óseo.

Dado que contienen poros de entre 5 y 200 nanómetros y tienen un contenido de agua extremadamente alto, son de utilidad potencial en la preparación de células tridimensionales y el crecimiento de tejidos, así como en medicina regenerativa. Además, el tamaño pequeño de los poros de estos armazones podría permitir que los medicamentos se liberaran lentamente, de modo que las personas no tendrían que tomarse sus medicamentos varias veces por día, sino una vez en un periodo más largo. Un dispositivo nanoarmazón de liberación lenta puede implantarse en la piel con suficientes insumos del medicamento para que dure meses o años.

LA CREACION DE ELEMENTOS BÁSICOS ADICIONALES

Usando como guía los lípidos naturales, se ha diseñado una nueva clase de detergentes peptídicos con características de lípidos. Estos péptidos contienen entre siete y ocho aminoácidos, lo que les concede una longitud similar a la de los lípidos naturales, y lo que hace que las paredes celulares sean 20.000 veces más delgadas que el diámetro de un cabello humano.

Un detergente peptídico simple con características de lípido produce estructuras notablemente complejas y dinámicas, del mismo modo que el ensamblado de numerosos ladrillos simples puede crear muchas estructuras arquitectónicas diferentes y distintas.

Se ha encontrado que algunos detergentes peptídicos son materiales excelentes para estabilizar proteínas de membrana notablemente difíciles de estabilizar - moléculas de proteína agregadas o asociadas con la membrana de una célula - lo que abre nuevos caminos para superar uno de los mayores desafíos de la biología, a saber: la obtención de imágenes claras de las ubicuas y vitales proteínas de membrana.

Numerosos medicamentos ejercen su efecto a través de las proteínas de membrana. Pero sigue siendo en su mayoría desconocido cómo estos medicamentos interactúan con las proteínas de membrana al nivel molecular más fino. Los detergentes peptídicos prometen cambiar esto. Si podemos comprender plenamente las interacciones de estas proteínas, puede que podamos

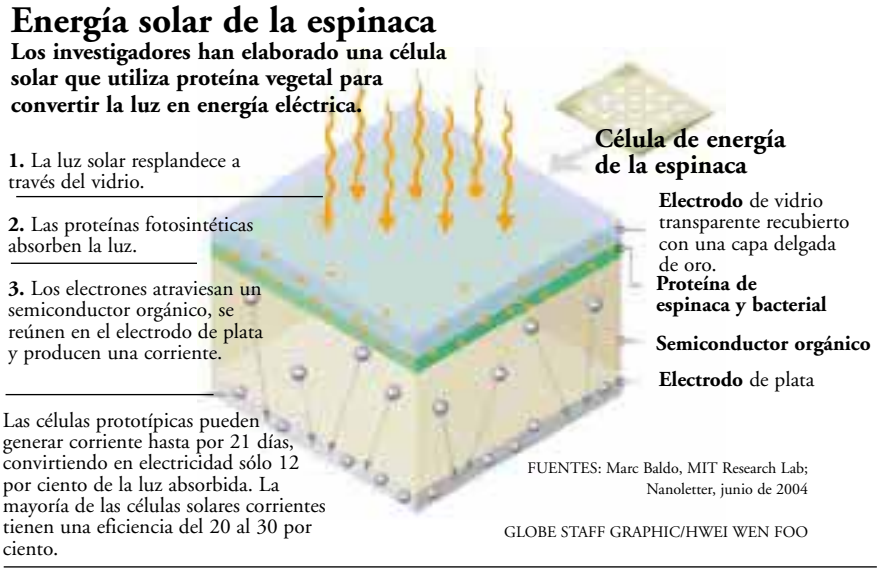


Figura 1. El chip de espinaca y la máquina molecular de recolección de energía biosolar. Los fotones (ya sea del sol o de cualquier otra luz), pueden ser convertidos directamente en energía eléctrica mediante la combinación del sistema fotosintético de una planta verde natural y el material semiconductor carbono C60 y materiales semiconductores – electrodos de oro y de plata.

elaborar fármacos más eficaces y eficientes, con pocos efectos secundarios, o con ninguno.

EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR

El estudio detallado de la función de las proteínas de membrana es apenas un ejercicio para comprender el fenómeno. Al profundizar nuestro conocimiento acerca de la comunicación de las células con su entorno, averiguamos la manera en la que los sistemas vivos responden a sus entornos. Con este conocimiento práctico, los nanobiólogos han comenzado a elaborar máquinas moleculares avanzadas, capaces de desarrollar sensores extremadamente sensibles con fines de detección médica, o para aprovechar la energía biosolar. Por ejemplo, los antiguos médicos chinos olían a un paciente para diagnosticar un problema médico, porque creían que una enfermedad puede cambiar el olor corporal o las secreciones del paciente. En la medicina moderna, se utilizan diversos instrumentos para hacer un diagnóstico preciso. En el futuro, un sensor de olor tan refinado como la nariz de un perro podría ayudar a diferenciar entre las personas con problemas médicos y las personas sanas. En el Reino Unido, los perros han demostrado su capacidad para identificar a las personas que padecen de cáncer, olfateando sus olores.

Nadie discutiría que la energía asequible, sostenible y ambientalmente sana es un requisito del bienestar de la civilización moderna. Dados los daños ambientales que causa la contaminación de los combustibles fósiles y la demanda creciente de energía a nivel mundial, los problemas energéticos del mundo son ahora más urgentes que nunca. Las soluciones alternativas, durante largo tiempo debatidas pero raramente perseguidas, se buscan ahora urgentemente.

Aún más, la naturaleza cada vez más móvil de la informática y las comunicaciones, y la nanonización de materiales y máquinas moleculares exigen que se desarrollen fuentes de energía más pequeñas, livianas y autosostenibles. Una fuente obvia de energía infinita es el sol. La naturaleza ha creado un sistema eficaz para convertir fotones directamente en electrones y luego en energía química. Las plantas verdes y otros organismos biológicos han venido usando este sistema durante miles de millones de años.

La mayor parte de la energía de la tierra se obtiene de la fotosíntesis mediante fotosistemas, el más eficiente sistema de recolección de energía. Si se pudiera aprovechar la energía producida por los fotosistemas naturales, contaríamos con una fuente de energía limpia y casi inagotable.

Los nanobiotecnólogos, tomando prestado de bacterias y plantas verdes el fotosistema de recolección de energía, han demostrado que los fotones pueden convertirse directamente en electrones mediante las recientemente diseñadas máquinas moleculares biosolares. Por medio de una combinación de ingeniería de precisión e ingeniería biológica del fotosistema, han construido un fotosistema en nanoescala de alta densidad extremada y máquinas moleculares ultra livianas de recolección de energía solar.

Para fabricar una máquina molecular de recolección de energía biosolar se requieren dos componentes claves: un sistema de producción de energía biosolar (fotosistema) de hojas de plantas verdes y los detergentes peptídicos diseñados. Para la producción de energía solar se usó un fotosistema más simple. Originalmente, los científicos purificaron el sistema de fotosíntesis de la espinaca, y recientemente han informado que purificaron con éxito sistemas fotosintéticos de arces, pinos y robles y de hojas de bambú. Todo el complejo del fotosistema, de sólo 20 nanómetros de altura, fue fijado en una superficie de oro con una orientación vertical.

Continúa la experimentación para idear maneras de aumentar la cantidad y duración de la energía producida por esta nueva y emocionante máquina de recolección de energía molecular (véase figura 1).

¿QUÉ NOS DEPARA EL FUTURO?

El desarrollo constante de materiales de nanobiotecnología y máquinas moleculares ahondará nuestro conocimiento de fenómenos aparentemente incomprensibles. La ingeniería en nanoescala mediante el diseño molecular de péptidos autoensamblados es una tecnología facilitadora que desempeñará, probablemente, un papel cada vez más importante en el futuro de la biotecnología y que cambiará nuestras vidas en las décadas futuras. Por ejemplo, los tejidos envejecidos y dañados podrán ser reemplazados por los armazones que estimularán a las células a reparar órganos del cuerpo o a rejuvenecer la piel. Puede que en el futuro seamos capaces también de nadar y bucear como delfines, o escalar montañas con un aparato pulmonar de nanoarmazón que pueda transportar oxígeno. Es posible prever que pintemos automóviles y casas con máquinas moleculares de fotosíntesis que puedan aprovechar, para todas las poblaciones del planeta y no sólo para unos pocos acaudalados, la energía solar ilimitada.

Apenas hemos dado comienzo a un gran viaje, y

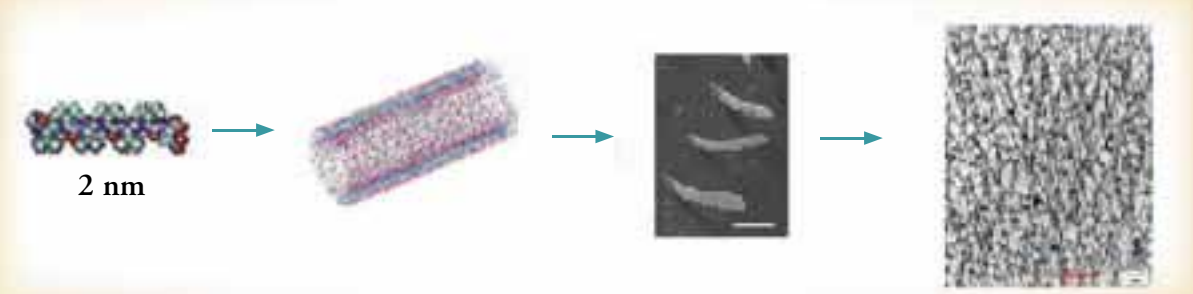
haremos muchos descubrimientos inesperados. Aunque los nanotecnólogos encaran muchos retos, persiguen activamente muchas cuestiones relacionadas con la fabricación molecular de materiales compuestos y máquinas moleculares. Los péptidos biotécnicos autoensamblados se pueden considerados los elementos básicos para la elaboración de materiales nuevos y de futuras máquinas moleculares construidas por el hombre. Estos péptidos pueden diseñarse también conjuntamente para incorporar otros elementos básicos como los azúcares, los lípidos, los ácidos nucleicos y un gran número de cristales de metales. La naturaleza nos ha inspirado y ha abierto la puerta de sus secretos. Corre por cuenta de nuestra imaginación expandir sus materiales y máquinas moleculares. ■

Las opiniones expresadas en este artículo no reflejan necesariamente los puntos de vista ni las políticas del gobierno de Estados Unidos.

Ejemplos de nuevos materiales nanobiotecnológicos

Péptido Lego

Detergentes peptídicos



Tinta peptídica

Los péptidos Lego, llamados también péptidos autocomplementarios, tienen 16 aminoácidos que miden alrededor de cinco nanómetros. Las moléculas de los péptidos Lego forman armazones de nanofibras que se pueden utilizar en los estudios de células cancerosas y células pluripotenciales, así como para la reparación de tejido óseo en medicina. **Los detergentes peptídicos**, cuyo tamaño es alrededor de dos nanómetros, pueden autoensamblarse y formar nanotubos y nanovesículas cuyo diámetro oscila entre los 30 y 50 nanómetros. Estos nanotubos conforman, a su vez, una red interconectada que puede utilizarse para desarrollar fármacos más eficaces y eficientes, con menos efectos secundarios. **La tinta peptídica**, que mide alrededor de cuatro nanómetros, puede emplearse como tinta en una impresora de inyección para imprimir directamente sobre una superficie, creando así instantáneamente cualquier diseño. La tinta peptídica, como la azul y la roja, sirve para alterar instantáneamente la propiedad de una superficie, de modo que las células puedan fijarse directamente a ella. Puede emplearse para desarrollar sensores basados en células y revestimientos de injertos médicos. Cuando la tinta peptídica se aplica sobre la superficie de un determinado diseño o forma, las células nerviosas de las ratas llegan a deletrear, por ejemplo, las siglas M.I.T., como se muestra aquí.

¿ADÓNDE SE DIRIGE LA NANOTECNOLOGÍA?

Akhlesh Lakhtakia

"Tiense en pequeño, sueñe a lo grande", es una frase típica en círculos de investigación científica para referirse a la promesa que encierra la nanotecnología. Relegada en una época a la ficción pura, la nanotecnología se vincula cada vez más a los adelantos en biotecnología y tecnología de la información. Con un gasto anual de investigación que, según se calcula, superó en 2004 los 2.600 millones de dólares en Estados Unidos, el prefijo "nano" se abre incluso camino en la cultura popular, desde los horóscopos diarios a las tirillas cómicas de los periódicos.

Sin embargo, el número relativamente pequeño de aplicaciones que se han fabricado para usos industriales representa un "avance evolucionario, en lugar de revolucionario", según un informe de un grupo de expertos la Real Sociedad de Londres y la Real Academia de Ingeniería.

www.cartoonstock.com

"Encontraron un defecto en el nuevo chip. Parece que alguien se quedó dormido en el pequeñísimo interruptor"

La nanotecnología no es un proceso único, ni involucra tampoco un material determinado. Más bien, el término nanotecnología se refiere a todos los aspectos de la producción de dispositivos y sistemas mediante la manipulación de materia a escala nanométrica.

Tome un trozo de hilo de 2,5 centímetros de largo y divídalo en 25 trozos, y a continuación divida cada uno de esos trozos en un millón de trozos más pequeños. Esos diminutos trozos miden alrededor de un nanómetro. La capacidad de manipular materia y procesos a escala nanométrica existe, indudablemente, en muchos laboratorios académicos e industriales. De acuerdo con la definición de escala nanométrica que ofrece el Consejo Nacional de Investigaciones de Estados Unidos, al menos una de las dimensiones pertinentes debe medir entre 1 y 100 nanómetros. Los revestimientos ultradelgados tienen una dimensión a escala nanométrica, y los nanoalambres y nanotubos tienen dos dimensiones a esta escala, en tanto que las nanopartículas tienen tres dimensiones en la escala nanométrica.

La nanotecnología se clasifica en tres tipos. El uso industrial de nanopartículas en la pintura de automóviles y los cosméticos es un ejemplo de nanotecnología incremental. Los sensores a nanoescala que explotan las propiedades fluorescentes de discos denominados puntos cuánticos (que miden entre 2 y 10 nanómetros de diámetro), así como las propiedades eléctricas de los nanotubos de carbono (que miden entre uno y 100 nanómetros de diámetro), representan la nanotecnología evolucionaria, pero su desarrollo se encuentra todavía en la etapa embrionaria. La nanotecnología radical, ingrediente de los relatos de ciencia ficción, no figura aún en el horizonte tecnológico.

A escala nanométrica las propiedades de la materia difieren de las propiedades a escala grande debido a que las superficiales totales por unidad de volumen son sumamente grandes a escala nanométrica. Los efectos cuánticos también desempeñan un papel a esta escala. Las propiedades y efectos de la nanoescala deberían transformar las prácticas actuales en electrónica integrada, optoelectrónica y medicina. Pero el paso del laboratorio a la producción en masa está colmado de retos significativos, y la manipulación confiable a nanoescala de la materia, sigue siendo una cuestión muy difícil de llevar a la práctica por razones económicas. Además, se tienen muy pocos datos sobre los riesgos a la salud que pueden derivarse de la nanotecnología.

La nanotecnología aparece en una etapa decisiva de nuestra civilización. Se está dando una convergencia sorprendente de nanotecnología, biotecnología y tecnología de la información. Algunas de las perspectivas sumamente agradables de esta simbiosis son, entre otras, los nuevos tratamientos médicos, tanto preventivos

como curativos; los sistemas de vigilancia de edificios, diques, barcos, aviones y otras estructuras vulnerables a desastres naturales y atentados terroristas; y los sistemas de producción de alto rendimiento energético que generan muy pocos residuos.

La convergencia de las tres tecnologías está prevista. Actualmente, se elaboran moléculas de proteína, como la kinesina, para transportar cargas moleculares, en obleas de silicio, a distancias del orden de un milímetro para uso final en sistemas de nanosensores inteligentes y sistemas de manufactura molecular. En los laboratorios farmacéuticos se emplean células, bacterias y virus para fabricar cadenas complejas a fin de precipitar moléculas clínicamente útiles, sin generar moléculas perjudiciales. La nanotecnología se emplea también para fabricar laboratorios montados en un chip que lleva a cabo ensayos de fluidos biológicos, cuyos datos son accesibles a la vista y pueden ser almacenados y procesados electrónicamente. Se tiene previsto utilizar sistemas de administración de medicamentos a nanoescala, en organismos vivos, para modificar funciones biológicas concretas; por ejemplo, para desarrollar o aumentar la inmunidad contra patógenos determinados.

La convergencia convierte también en necesidad apremiante una mejor regulación y fiscalización. Dado que la mayoría del trabajo se lleva a cabo bajo los auspicios del gobierno se les debe dar más autoridad a los grupos de fiscalización ciudadana y las organizaciones no gubernamentales, así como los grupos de expertos científicos del sector privado, para supervisar estas investigaciones. De la misma manera, deben dictarse leyes que guíen la conducta de personas a cargo de los programas gubernamentales de nanotecnología, y los de contratistas privados.

La nanotecnología es, hoy, probablemente igual que Mozart a los cinco años, o sea, lleno de promesas y con lo mejor aún por llegar, si se le cuida y cultiva por unos años.

Akhlesh Lakhtakia es catedrático eminente de ingeniería y mecánica de la Pennsylvania State University.

Las opiniones expresadas en este artículo no reflejan necesariamente los puntos de vista ni las políticas del gobierno de Estados Unidos.

ESTUDIO DE CASO: PROYECTO INTERNACIONAL DE SECUENCIACIÓN DEL GENOMA DEL ARROZ

C. Robin Buell

Peter Beyer/Universidad de Freiburg

Arroz dorado y arroz blanco normal.

Lo que comenzó como un proyecto de investigación japonés se transformó en una iniciativa de investigación internacional que produjo un instrumento clave para promover una segunda "revolución verde". Mediante la participación de investigadores y recursos de distintos países, el Proyecto Internacional de Secuenciación del Genoma del Arroz (IRGSP) logró producir en 2005 un "mapa" de las características genéticas del arroz. Este mapa permitirá a los fitogenetistas acelerar sus programas de reproducción y desarrollar variedades de arroz más robustas y a los agricultores mejorar sus métodos y extender las temporadas de cultivo. Asimismo, los científicos han podido utilizar el genoma del arroz para avanzar sus investigaciones de otros cereales.

***C. Robin Buell** es investigadora adjunta del Instituto de Investigación Genómica (TIGR) y participó en el IRGSP.*

Un antiguo proverbio chino dice que "las cosas más valiosas no son ni las perlas ni el jade, sino los cinco cereales, de los cuales el mejor de todos es el arroz". En efecto, en función del consumo mundial diario, el arroz es más preciado que las perlas: alrededor de 50 por ciento de los habitantes del planeta consumen arroz todos los días. Para gran porcentaje de ellos el arroz es la principal y posiblemente la única fuente de calorías.

El poder suministrar arroz suficiente de alto contenido nutritivo es indispensable para satisfacer las necesidades de la población mundial. Si bien la fitogenética convencional ha aumentado significativamente la producción del arroz, las iniciativas internacionales de colaboración han dado ocasión a mejores conocimientos sobre el genoma del arroz, lo cual promete el desarrollo de variedades de arroz de mayor rendimiento y resistencia a enfermedades.

UNA SEGUNDA REVOLUCIÓN VERDE

Durante los últimos 40 a 50 años los científicos llevaron a cabo importantes mejoras en el rendimiento, la resistencia a las plagas y el contenido nutritivo del arroz, así como de otros cultivos. Lo lograron mediante la aplicación de métodos fitogenéticos convencionales de mezclas genéticas entre variedades de plantas y selección de la progenie más deseable. Esta etapa de mejoras en la producción agrícola se denominó Revolución Verde, y el destacado genetista Norman Borlaug recibió en 1970 el Premio Nobel de la Paz por sus logros para mejorar la producción agrícola.

Takuji Sasaki

Participantes del IRGSP. La autora del artículo, tercera en primera fila, de izquierda a derecha.

Sin embargo, la creciente población mundial, así como la reducción de tierras de cultivo, presentarán en el siglo XXI graves desafíos a la capacidad del planeta para alimentarse. Por lo tanto, se necesita una segunda "revolución verde".

Un instrumento que se utiliza actualmente y que podría fomentar esta segunda revolución verde es la genómica, que entraña el estudio de los genes de un organismo y la función que desempeñan en el crecimiento y desarrollo del mismo. La genómica logró un gran avance hace unos 10 años, cuando investigadores del Instituto de Investigación Genómica, en Estados Unidos, lograron determinar la secuencia completa (mapa de la constitución genética) de un microorganismo viviente, la *Haemophilus influenzae*, una bacteria que causa la gripe. Las técnicas desarrolladas en el instituto se utilizan ahora extensamente para determinar las características genéticas de todo tipo de organismos, incluidos animales, plantas y hongos.

EL PROYECTO DEL GENOMA DEL ARROZ

A principios de los años noventa, científicos japoneses comenzaron a estudiar la secuencia del genoma del arroz. En 1998, a fin de acelerar esta labor y utilizar la experiencia internacional, un grupo de científicos de varios países, encabezados por investigadores japoneses, iniciaron el Proyecto Internacional de Secuenciación del Genoma del Arroz (IRGSP). Con financiamiento de muchos países - entre ellos Japón, China, Corea, Tailandia, India, Francia, Brasil, Taiwán y Estados Unidos - cientos de científicos de todo el mundo contribuyeron a la secuenciación del genoma del arroz. La colaboración internacional facilitó la división del trabajo y la distribución de costos entre los participantes. Además, hizo posible que los participantes tuvieran un interés concreto en el proyecto y que fuera reconocida su labor al descifrar un cromosoma completo, o parte de él. El proyecto se completó en diciembre de 2004 y los resultados se publicaron en agosto de 2005.

El IRGSP logró identificar más de 37.000 genes del genoma del arroz, más que el número de genes del genoma humano. La comparación entre otras secuencias del genoma del arroz con la secuencia que obtuvo el IRGSP resultó en dio paso a la identificación de más de 80.000 nuevos marcadores genéticos, es decir, genes que producen una característica reconocible, lo cual permitirá a fitogenetistas acelerar sus programas de reproducción y crear variedades de arroz más robustas.

Incluso antes de que el IRGSP completara su tarea, los investigadores del proyecto hicieron públicos sus hallazgos a científicos de todo el mundo, con la finalidad de que pudieran utilizar la información en diversas investigaciones de biología vegetal.

La duración del día, es decir, la relación entre horas diurnas y horas nocturnas, que cambia según la temporada, controla la floración de plantas como el arroz y, por consiguiente, el momento en el que echa semillas. Al identificar el mecanismo que fija el momento de floración, los científicos pueden ahora intentar elaborar variedades de arroz que florezcan más temprano durante la temporada de siembra, ampliando de esta manera la temporada de cultivo para los agricultores.

CONSECUENCIAS MÁS AMPLIAS

Aunque el arroz desempeña un papel importante en la agricultura mundial, para los científicos tiene además otra función. Es de sobra conocido que primates como los seres humanos y los chimpancés tienen genes y genomas similares. Esa misma relación se presenta en el arroz y sus parientes cercanos, es decir, en cereales como el trigo, el maíz, la avena, el sorgo y el mijo. Por motivos técnicos y financieros sólo se dispone de una secuencia completa de genoma: la del arroz. Pero dada la estrecha relación que hay entre cereales, los científicos que investigan otros cereales han podido utilizar el genoma del arroz para avanzar en sus investigaciones. En efecto, se podido utilizar la secuencia del genoma del arroz para identificar un gen clave de la cebada que controla la resistencia a un patógeno fúngico responsable de la enfermedad del oídio, que afecta a las plantas.

Los beneficios del proyecto del genoma del arroz son evidentes:

• A medida que se crean nuevas especies y variedades de

cultivo más resistentes y se aumentan los conocimientos sobre biología básica vegetal, los países estarán bien preparados para satisfacer las necesidades de una población cada vez mayor en el siglo XXI.

• El formato de colaboración del IRGSP demuestra los avances científicos que se pueden lograr cuando expertos de todo el mundo tienen acceso a los resultados de las investigaciones de sus colegas.

• El IRGSP ha dejado sentado que los emprendimientos científicos de vanguardia no tienen porque incluir sólo a países altamente desarrollados, y que las acciones internacionales de colaboración pueden permitir que las naciones menos desarrolladas adquieran la tecnología más moderna.

• La experiencia del IRGSP probablemente generará nuevas iniciativas con características de colaboración más fuertes. Esto ya ha comenzado con el Consorcio Internacional de Genómica Funcional del Arroz, iniciativa de cooperación entre científicos internacionales para ampliar el conocimiento de las funciones de más de 37.000 genes del arroz con el propósito de satisfacer las crecientes necesidades de producción.

COLABORACIONES PÚBLICO-PRIVADAS

Claramente, la tarea de completar la misión del IRGSP fue un desafío y hubo obstáculos en el camino. La cuestión más grande que afrontó el IRGSP tuvo que ver con las iniciativas paralelas de secuenciación del genoma del arroz por Monsanto y Syngenta, dos grandes empresas internacionales de agroindustria, y el Instituto de Genómica de Beijing, un centro de investigación en China. El IRGSP posteriormente colaboró con Syngenta y Monsanto para establecer una colaboración público-privada sumamente productiva. La colaboración incorporó datos del sector privado en los resultados de las investigaciones públicas.

Las ventajas han excedido con mucho cualquier dificultad. Además de brindar un recurso invalorable para científicos y agricultores del mundo, la culminación exitosa del IRGSP demuestra que la colaboración científica internacional es productiva y sirve fines más grandes que los de sus metas iniciales. Ciertamente, las acciones de colaboración internacional deberían considerarse como una estrategia viable para otros grandes emprendimientos científicos. ■

Las opiniones expresadas en este artículo no reflejan necesariamente los puntos de vista ni las políticas del gobierno de Estados Unidos.

LOS ORÍGENES DE LA BIOTECNOLOGÍA: El aprovechamiento de las posibilidades del ADN

Dinesh Ramde

La evolución de la biotecnología, desde el descubrimiento de la estructura del ADN hasta la terapia génica experimental, se ha caracterizado por descubrimientos revolucionarios y fascinantes adelantos técnicos. Estos hechos han dado pie a la idea de que podemos realizar mejoras radicales a la atención de salud, la agricultura, la producción de recursos energéticos y otros campos. Pero la rapidez con que cobró impulso la industria de la biotecnología, la magnitud de su éxito y el alcance de su impacto han sorprendido hasta a sus precursores. Estas consideraciones, dicen los expertos de la industria, hacen que confíen aún más en que la biotecnología cumplirá su promesa inicial en un futuro no muy distante.

A. Barrington Brown/Photo Researchers, Inc.

Los descubridores de la estructura del ADN, James Watson (izquierda) y Francis Crick, examinan su modelo de una molécula de ADN.

Dinesh Ramde *es redactor de la Associated Press*

Concentrarse en la historia de la biotecnología es como escribir una autobiografía siendo un adolescente—parece extraño hablar del pasado cuando hay todavía tanto por delante.

Sin embargo, la industria de la biotecnología ha recorrido un camino vertiginoso desde sus humildes orígenes en austeros laboratorios un cuarto de siglo atrás. El crecimiento de la industria se ha caracterizado por técnicas científicas innovadoras y por descubrimientos significativos en todo el mundo.

La biotecnología es fascinante no por lo que ya ha logrado, sino por las nuevas fronteras que aún le quedan por explorar. Los científicos prevén cambios revolucionarios en la manera en que alimentamos al mundo, vacunamos a nuestros hijos y limpiamos nuestro aire y nuestras aguas.

En la medida en que ha madurado la biotecnología, echamos un vistazo atrás a sus orígenes y juventud, a través de la mirada de los científicos y emprendedores que la concibieron.

LOS ORÍGENES DE LA BIOTECNOLOGÍA

En 1863, el botánico austriaco Gregor Mendel descubrió que las plantas de los guisantes transmitían sus características, de la planta progenitora a la progenie, en unidades biológicas discretas que más tarde se conocerían como genes. Seis años más tarde, el bioquímico suizo Johann Friedrich Miescher aisló de los glóbulos blancos la sustancia que se llamaría ácido desoxirribonucleico, o ADN.

Pasarían otros 75 años antes de que se hiciera una conexión entre los dos descubrimientos. En 1944, el biólogo canadiense Oswald Avery propuso la idea de que el ADN era el mecanismo mediante el cual la bacteria transmitía su material hereditario. Sin embargo, la explicación de Avery fue recibida con escepticismo por aquellos que creían que la información genética de un organismo era demasiado compleja para estar contenida en el ADN.

Más tarde, en 1953, el biólogo estadounidense James Watson y el biólogo molecular británico Francis Crick, determinaron la estructura de doble hélice del ADN, lo que a su vez derivó en una multitud de descubrimientos nuevos en torno a cómo funciona el ADN a nivel molecular.

Estos descubrimientos fueron adelantos solamente en el campo de la bioquímica. No fue sino hasta 1972 que los científicos introdujeron una manera de combinar la bioquímica con una técnica que dio origen a la biotecnología. Ese año, los bioquímicos estadounidenses Herbert Boyer, Paul Berg y Stanley Cohen, desarrollaron el ADN recombinante, una molécula de ADN modificada creada al combinarse el ADN de dos organismos no relacionados.

Toda célula de un organismo viviente, ya sea una

bacteria o un ser humano, contiene ADN. El ADN está constituido, a su vez, por cuatro elementos básicos denominados bases, cuyos nombres se abrevian con las letras A, T, G y C. De la misma manera en que se ordenan, repiten y unen las veintiséis letras del alfabeto para formar oraciones, las cuatro bases del ADN se unen en series para conformar un orden único en cada ser vivo.

El ADN es un plan maestro permanente que produce análogos provisionales de sí mismo denominados ácido ribonucleico, o ARN, que se encarga de ordenar al mecanismo celular a que elabore proteínas. Cada cadena de bases de ADN que codifica una proteína se denomina gen.

Puede pensarse en un gen como un conjunto de instrucciones que le dice al mecanismo de una célula cómo debe unir los aminoácidos para formar una proteína. El mecanismo de cualquier célula, ya sea bacteriana o humana, empleará ese conjunto de instrucciones para elaborar exactamente la misma secuencia de aminoácidos y, por consiguiente, la misma proteína.

En ese caso, razonaron Boyer y sus colegas, ¿qué pasaría si tomáramos un gen humano que elabora una proteína vital y lo insertamos en ADN bacteriano, obligando a la bacteria a producir cantidades constantes de esa proteína? El momento en que Boyer y su equipo hicieron eso, y crearon un ADN recombinante que unió el ADN humano con el bacteriano, nació la biotecnología. Los científicos habían descubierto una manera de convertir organismos sencillos como las bacterias en fábricas, minúsculas líneas de ensamblaje que fabrican proteínas humanas esenciales como la insulina y la hormona del crecimiento humano.

EL MUNDO EMPRESARIAL RESPONDE

La tecnología en ciernes y los organismos modificados genéticamente que ésta produjo inspiró tanto temor como entusiasmo. "Tuvimos que tener suma cautela—no es posible volver a poner estas cosas en una botella", dice George Rathmann, primer director general de la empresa biotecnológica Amgen, en Thousand Oaks, California. "Podría ser que resulte en un nuevo agente infeccioso más mortífero que la viruela o el estreptococo, y sería peor aún si fuera combinado y se transformara en un organismo viral".

Preocupaciones de esta índole motivaron a los científicos a convocar la Conferencia de Asilomar, en Pacific Grove, California. En ella, cerca de 140 científicos establecieron reglas estrictas que dictaron los límites a que debían restringirse las investigaciones en torno al ADN recombinante. Las reglas dispusieron, por ejemplo, que sólo se podría aplicar la tecnología en organismos que no pueden vivir por sí solos fuera de un laboratorio, y que no se debía utilizar en genes que podrían ser activos en seres humanos.

AP/WWP/Paul Sakuma

Bioproceso en una sala de desarrollo celular en la empresa Genentech.

"Sin duda fue motivo de preocupación en la industria", recuerda Rathmann. "En los Laboratorios Abbott, el temor acerca del ADN recombinante fue tal que sus empleados tenían que ponerse indumentaria protectora, cascos, es decir, literalmente casi un traje espacial. Algunas empresas fueron tan cautelosas—hasta el punto de la exageración—que nunca llegaron a empezar".

Otras empresas adoptaron la nueva tecnología. Boyer se unió a Bob Swanson, inversionista con capital de riesgo, para fundar en 1976 la firma Genentech, en el sur de San Francisco. Desde el principio, Boyer vio el potencial de la nueva tecnología. "Se presentó algo muy interesante, una gran oportunidad para convertir el esfuerzo académico en el que había participado en algo significativo como suministrar medicamentos y fármacos para ayudar a la gente", dice Boyer.

A Genentech no le tardó mucho dejar su impronta, al desarrollar una insulina humana elaborada por bacterias producto de la ingeniería genética. La Administración de Alimentos y Fármacos, organismo normativo del gobierno de Estados Unidos, aprobó el medicamento en 1982. En los años siguientes, otras empresas se dedicaron a producir fármacos similarmente derivados de bacterias modificadas, fármacos que impedían el rechazo del transplante del riñón, reponían leucocitos en pacientes sometidos a quimioterapia y trataban la hemofilia.

Las plantas también se beneficiaron de la tecnología de ADN recombinante. En 1987, la empresa Advanced Genetic Sciences creó una bacteria modificada genéticamente que impedía que se formara escarcha en las plantas de las fresas y las patatas. Esta tecnología ha facilitado la producción de alimentos más resistentes y nutritivos. Por ejemplo, el arroz ha sido modificado genéticamente para que contenga un alto contenido de

vitamina A, y los tomates han sido modificados para que produzcan menor cantidad de la sustancia que hace que se pudran. Ambos fueron cambios que no se podían haber logrado a través de una simple cría selectiva.

Gusto/ Photo Researchers, Inc.

Ian Wilmut y su creación, Dolly, la primera oveja clonada de una célula de oveja adulta.

Aquellos que critican la tecnología dicen que los alimentos modificados genéticamente acarrean riesgos de salud que no existen en los cultivos producidos con técnicas de selección tradicionales, reivindicación que nunca ha sido demostrada. Hay quienes sostienen también que las compañías que producen cultivos modificados pueden en último término reclamar derechos intelectuales, así como financieros, sobre estos cultivos, en perjuicio de los pobres en los países en desarrollo. Hasta el momento ha ocurrido lo contrario, puesto que los agricultores de países en desarrollo se benefician del mayor rendimiento de las cosechas de cultivos biotecnológicos.

EL DESARROLLO DE NUEVAS CIENCIAS

Las técnicas que han hecho posible la manipulación del ADN han permitido a los científicos dedicarse a tecnologías radicalmente nuevas. En la década de los ochenta, la empresa PPL Therapeutics, de Edimburgo, Escocia, se sirvió de la ingeniería genética para crear a Rosie, una vaca cuya leche contenía la proteína humana alfa-lactalbumina. La leche se puede administrar a bebés prematuros que son demasiado pequeños para amamantar, y el aumento proteínico proporciona los aminoácidos indispensables para el desarrollo del bebé.

Los embriones de Rosie se utilizaron para crear clones de la vaca, clones que se permitirá que se reproduzcan normalmente para crear un rebaño de vacas lecheras mejoradas. El proceso de clonación entraña retirar el ADN de una de las células de Rosie para que reemplace el ADN de otro embrión de vaca. El ternero resultante es entonces idéntico a Rosie. Estos experimentos se han llevado a cabo durante años en ranas, ratones y ovejas.

En 1997, los científicos del Instituto Roslin, en Escocia, revelaron una noticia aún más espectacular. Habían clonado una oveja tomando el ADN de una célula de oveja e insertándolo en una célula mamaria, en lugar de un embrión, con lo que demostraron por primera vez que hasta las células "adultas" pueden transformarse en células diferentes. Hasta ese momento, se pensaba que el proceso se limitaba a células pluripotenciales inmaduras.

Un año más tarde, el estadounidense James Thompson, biólogo del desarrollo, creó por primera vez células pluripotenciales embriónicas humanas—células valiosas por su habilidad de convertirse en células determinadas. Los científicos están estudiando para ver si se puede utilizar células pluripotenciales para reemplazar células muertas o dañadas, cosa que daría a los pacientes que han perdido sus facultades cerebrales u orgánicas una esperanza de curación.

Además de la tecnología del clonaje, en la década de 1990 se llevó a cabo otro proyecto revolucionario en torno al ADN. Desde el momento en que Watson y Crick descifraron la estructura molecular del ADN, los científicos confiaron en que podrían identificar todos los genes del ADN humano, una tarea amedrentadora si se considera que un ser humano tiene entre 20.000 y 25.000 genes. Para 1990, la tecnología había avanzado lo suficiente para que un consorcio mundial emprendiera esta audaz empresa, llamada Proyecto Genoma Humano.

El proyecto tenía tres objetivos: identificar cada gen humano; determinar el orden de los tres mil millones de pares de bases—es decir, los elementos básicos A, T, G y C—que constituyen el ADN humano; y poner esa secuencia a disposición de los investigadores. El proyecto se concluyó en 2003, dos años antes de lo previsto, y los científicos están analizando actualmente la información para fines médicos de terapias génicas.

MÁS ALLÁ DE TODA EXPECTATIVA

La industria de la biotecnología creció y se desarrolló con una rapidez que ni Boyer ni Rathmann pudieron prever.

"Al ver lo que está sucediendo hoy, es increíble", dice Boyer. "Desde luego teníamos grandes expectativas, y cuando empezamos nos sentíamos como niños en una tienda de dulces, con innumerables posibilidades. Recuerdo que al principio, cuando desarrollamos las

técnicas de ADN recombinante, pensé que esta tecnología era ilimitada. Pero aún así no podíamos prever todo esto". Rathmann abandonó una profesión cómoda en medicina diagnóstica para convertirse en director general y tercer empleado de Amgen, una jugada que según él prueba su tremenda confianza en la tecnología. "La decisión me fue fácil porque la ciencia era tan poderosa", dice. "Pero es absolutamente errado insinuar que la industria evolucionó en la forma en que creíamos que lo haría. No es de sorprender que tuviera tanto éxito, pero la magnitud de su éxito, su importancia para la medicina humana, es realmente increíble".

Rathmann recuerda haber visto durante los años ochenta cifras del gobierno que indicaban que la industria de la biotecnología podría algún día alcanzar los 4.000 millones de dólares. "Eso demuestra lo mal que nos lo habíamos imaginado", dice. "Amgen por sí sola se convirtió en una compañía valorada en 95.000 millones de dólares".

Para Rathmann, sin embargo, el dinero es secundario. A sus 77 años de edad, el otrora director general toma casi todos los días Epogen, un medicamento Amgen modificado genéticamente, para combatir la nefropatía que padece. Rathmann considera que los primeros veinticinco años de la industria son sólo el comienzo de algo grandioso.

"El futuro parecía ser extremadamente brillante en 1980, y hoy es más interesante aún porque ha habido tantos éxitos", dice. "Creo que veremos un florecimiento continuo de los efectos de la biotecnología. Es una ciencia muy, muy hermosa". ■

Las opiniones expresadas en este artículo no reflejan necesariamente los puntos de vista ni las políticas del gobierno de Estados Unidos.

LOS PRIMEROS 142 AÑOS DE LA BIOTECNOLOGÍA

1863	Gregor Mendel descubre que las plantas de guisantes transmiten información genética en unidades definidas que más tarde se llamarán genes.
1869	Johann Friedrich Miescher aisla el ADN de leucocitos humanos.
1944	Tras analizar bacterias neumococo, Oswald Avery y col. concluyen que el ADN es el material hereditario.
1953	James Watson y Francis Crick descubren la estructura molecular de doble hélice del ADN.
1955	Fred Sanger determina la secuencia del aminoácido de la insulina.
1972-73	Paul Berg, Herbert Boyer y Stanley Cohen desarrollan técnicas de ADN recombinante.
1975	Científicos manifiestan su preocupación de que el ADN recombinante podría derivar en la creación de organismos peligrosos. En la Conferencia de Asilomar, un grupo de científicos formula limitaciones estrictas en torno al uso de técnicas de ADN recombinante.
1976	Herbert Boyer y Bob Swanson fundan la empresa precursora Genentech..
1978	La somatostatina se convierte en la primera proteína humana elaborada con tecnología recombinante.
1984	Chiron Corporation anuncia la clonación y secuenciación del genoma completo del VIH..
1985	Por primera vez se prueban en el terreno plantas producto de la ingeniería genética resistentes a insectos y virus
1990	GenPharm International, una empresa biofarmacéutica, crea la primera vaca lechera transgénica, que produce proteínas de leche humana que se utiliza en fórmula infantil.
1990	Se inicia el Proyecto Genoma Humano.
1993	La Administración de Alimentos y Fármacos de EE.UU. concluye que los alimentos modificados genéticamente no son inherentemente peligrosos.
1997	Investigadores del Instituto Roslin, en Escocia, anuncian la clonación de una oveja
1998	Dos grupos de investigadores logran crear células pluripotenciales embriónicas.
2003	Concluye el Proyecto Genoma Humano.
2004	Científicos coreanos anuncian la clonación de una célula embriónica humana

REGLAMENTACIÓN DE LA BIOTECNOLOGÍA AGRÍCOLA EN ESTADOS UNIDOS

Tres agencias del gobierno de Estados Unidos—el Departamento de Agricultura (USDA), la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y la Administración de Alimentos y Fármacos (FDA)—se encargan de supervisar las plantas y los productos modificados genéticamente. Sus responsabilidades son complementarias y en algunos casos coinciden. El Servicio de Inspección de Salud de Animales y Plantas del USDA tiene autoridad sobre la plantación de cultivos transgénicos. La EPA, por su parte, tiene jurisdicción sobre la comprobación, distribución y utilización de plaguicidas introducidos por modificación genética en los cultivos, y la FDA tiene competencia sobre los usos alimentarios y de forraje de todos los alimentos derivados de plantas. El extracto que sigue describe brevemente la función que desempeña cada agencia en la reglamentación de los organismos transgénicos.

SERVICIO DE INSPECCION DE SALUD DE ANIMALES Y PLANTAS DEL DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE ESTADOS UNIDOS

Dentro del USDA, el Servicio de Inspección de Salud de Animales y Plantas (APHIS) se encarga de proteger a la agricultura contra plagas y enfermedades. De conformidad con la Ley de Protección de Plantas, el USDA-APHIS tiene potestad normativa sobre productos de biotecnología que puedan plantear dichos riesgos. Por consiguiente, la agencia regula los organismos y productos que se conoce o se sospecha que son plagas, o que plantean peligro de plaga, incluidos aquellos que han sido modificados o elaborados mediante la ingeniería genética. A estos se les llama "artículos reglamentados". El USDA-APHIS fiscaliza la importación, manipulación, transporte interestatal y descarga al medio ambiente de organismos reglamentados producto de la biotecnología, incluidos los organismos sometidos a usos experimentales confinados o ensayos sobre el terreno. Los artículos reglamentados son examinados para asegurar que, bajo las condiciones de uso propuestas, no representan un peligro de plaga para los cultivos.

Las reglamentaciones del USDA-APHIS estipulan un trámite de recurso para determinar la condición no reglamentada. Si se aprueba el recurso, el organismo deja de considerarse artículo reglamentado y no será sometido a la fiscalización del USDA-APHIS. El solicitante debe entregar documentación sobre la biología de la planta, datos y publicaciones sobre los experimentos efectuados, descripciones de las características genotípicas y fenotípicas del organismo modificado genéticamente, e informes sobre ensayos prácticos. La agencia evalúa numerosas cuestiones, entre ellas el potencial de peligro de plaga en el cultivo; la susceptibilidad a enfermedades y plagas; la expresión de productos genéticos, enzimas nuevas, o cambios en el metabolismo de la planta; el estado herboso y su impacto en plantas sexualmente compatibles; las prácticas agrícolas o de cultivo; los impactos en organismos no objetivos; y el potencial de una transferencia de genes a otros tipos de organismos. El aviso relacionado se publica en el Federal Register [publicación del gobierno], y se consideran los comentarios públicos acerca de la evaluación de impacto ambiental y la resolución tomada para la decisión de aprobar y otorgar el recurso. Las copias de los documentos del USDA-APHIS están a disposición del público.

Para más información en inglés, visite http://www.aphis.usda.gov/brs/.

De conformidad con la Ley de Virus, Sueros y Toxinas, el departamento de Servicios Veterinarios del USDA-APHIS inspecciona los establecimientos de producción de sustancias biológicas y autoriza las sustancias para uso veterinario, incluidas vacunas para animales que son producto de la biotecnología.

Para más información en inglés, visite http://www.aphis.usda.gov/vs/.

AGENCIA DE PROTECCION AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS (EPA)

A fin de proteger la salud y el medio ambiente, la EPA regula mediante un trámite de registro, la venta, distribución y uso de los plaguicidas, independientemente del método de producción o modo de actuación de los mismos. Esto incluye la reglamentación de plaguicidas producidos por un organismo mediante las técnicas de la biotecnología moderna. La División de Plaguicidas Biológicos y Prevención de la Contaminación, de

la Oficina de Programas de Plaguicidas regula, de conformidad con la Ley Federal de Insecticidas, Fungicidas y Rodenticidas, la distribución, venta, uso y comprobación de sustancias plaguicidas producidas en plantas y microbios. Generalmente, se otorgan permisos de uso experimental para ensayos en el terreno. Los solicitantes deben inscribir los productos plaguicidas antes de su venta y distribución, y puede que la EPA exija condiciones de su uso como parte de la inscripción. La EPA fija también los límites de tolerancia para los residuos de plaguicidas en alimentos y forrajes, o establece, conforme a la Ley Federal de Alimentos, Fármacos y Cosméticos, una exención del requisito de tolerancia.

Para más información en inglés, visite http://www.epa.gov/pesticides/biopesticides.

El Programa de Biotecnología y la Ley de Control de Sustancias Tóxicas de la Oficina de Prevención y Sustancias Tóxicas de la EPA regulan los microorganismos destinados a usos industriales generales. Antes de ser introducidos en el mercado, el programa lleva a cabo una revisión de microorganismos "nuevos", es decir, aquellos microorganismos elaborados mediante la combinación deliberada de material genético de organismos clasificados en diferentes géneros taxonómicos.

Para más información en inglés, visite http://www.epa.gov/oppt/biotech/.

ADMINISTRACIÓN DE ALIMENTOS Y FÁRMACOS DE ESTADOS UNIDOS (FDA)

La FDA es responsable de asegurar la inocuidad y el etiquetado correcto de todos los alimentos y forrajes derivados de plantas, incluidos aquel producto de la bioingeniería. Todos los alimentos y forrajes, ya sea si son importados o nacionales, o si derivan de cultivos modificados mediante técnicas de selección convencionales o de modificación genética, deben cumplir con las mismas normas estrictas de inocuidad. De conformidad con la Ley Federal de Alimentos, Fármacos y Cosméticos, los fabricantes de alimentos y forrajes son responsables de garantizar que los productos que venden son inocuos y están correctamente etiquetados. Además, cualquier aditivo alimentario que se agregue a los alimentos, incluidos los que se introducen en el alimento o forraje durante la cría selectiva de plantas, deben tener autorización de la FDA antes de su venta. (El término "aditivo alimentario" se refiere a sustancias no plaguicidas introducidas en el alimento y cuya inocuidad no la reconocen generalmente los expertos científicos cualificados).

Mediante su autoridad de ejecución conforme a la Ley Federal de Alimentos, Fármacos y Cosméticos, la FDA asegura que los fabricantes de alimentos y forrajes cumplen con sus obligaciones. Para ayudar a que los patrocinadores de alimentos y forrajes derivados de cultivos modificados genéticamente, cumplan sus obligaciones, la FDA les insta a participar en su proceso voluntario de consulta. Todos los alimentos y forrajes derivados de cultivos transgénicos que se encuentran actualmente en el mercado de Estados Unidos han pasado por este proceso de consulta. A excepción de un solo producto, se llegó a la conclusión de que ninguno de estos alimentos y forrajes contenía aditivos alimentarios, por lo que no tuvieron que someterse a una aprobación previa antes de su comercialización.

Para más información en inglés, visite http://www.cfsan.fda.gov/~lrd/biotechm.html

---

Fuente: Sitio web sobre biotecnología de las agencias reguladoras de Estados Unidos: http://usbiotechreg.nbii.gov/roles.asp

GLOSARIO DE TÉRMINOS DE BIOTECNOLOGÍA

ADN (ácido desoxirribonucleico): Material genético de todas las células y de muchos virus; la molécula que codifica la información genética. El ADN es una molécula de cadena doble unida por enlaces débiles entre pares de bases de nucleótidos. Los cuatro nucleótidos del ADN contienen las bases adenina (A), guanina (G), citosina © y tiamina (T). En estado natural, los pares de bases se forman sólo entre A y T y G y C; por tanto, la secuencia de las bases de una de las dos cadenas se puede deducir de la otra.

Aminoácidos: Los bloques más básicos de construcción de todas las formas de vida. Los aminoácidos son moléculas que contienen grupos funcionales de amino y carboxilo.

Anticuerpo monoclonal: Anticuerpo que se produce en masa en el laboratorio a partir de un solo clon y que reconoce sólo un antígeno. Los anticuerpos monoclonales se suelen producir mediante la fusión de una célula B, de corta vida, productora de anticuerpos, con una célula de crecimiento rápido, como una célula cancerosa. La célula híbrida resultante, o hibridoma, se multiplica rápidamente y crea un clon que produce gran cantidad de anticuerpos.

Antígeno: En general, proteína que se halla en la superficie del virus y que estimula la respuesta inmunitaria, en particular, la producción de anticuerpos.

Autoensamblaje molecular: Ensamblaje de moléculas sin dirección o intervención externa. El autoensamblaje puede producirse espontáneamente en la naturaleza, por ejemplo en células (como el de la membrana de doble capa lipídica) y otros sistemas biológicos, así como en sistemas modificados con intervención humana. Muchos sistemas biológicos se valen de este procedimiento para ensamblar varias moléculas y estructuras. La imitación de estas estrategias y la creación de nuevas moléculas capaces de autoensamblaje supramolecular, es una importante técnica de la nanotecnología.

Bioinformática: El uso de las matemáticas aplicadas, la estadística y la ciencia de la informática para estudiar sistemas biológicos. Importantes sectores de investigación incluyen alineación de secuencias, búsqueda de genes, ensamblaje del genoma, alineación de la estructura de las proteínas, predicción de la estructura de las proteínas, predicción de la expresión de genes e interacciones entre las proteínas.

Bioplaguicidas: Determinados tipos de plaguicidas derivados de materiales naturales, como animales, plantas, bacterias, y algunos minerales. Por ejemplo, el aceite de canola y el bicarbonato sódico se consideran bioplaguicidas.

Biotecnología: Serie de técnicas biológicas obtenidas mediante la investigación básica y aplicadas a la investigación y elaboración de productos. La biotecnología se refiere al uso de ADN recombinante, la fusión de células y nuevas técnicas de bioelaboración.

Cartografía genética: Proceso para determinar el lugar que ocupan los genes en un cromosoma.

Célula: Unidad estructural y funcional básica de todos los organismos. Las células contienen ADN y otros muchos elementos que permiten su funcionamiento.

Célula pluripotencial: Célula indiferenciada capaz de replicarse indefinidamente. Una célula pluripotencial puede también producir células especializadas para diversos tejidos del cuerpo, como músculo cardíaco, tejido cerebral y tejido hepático. Los científicos pueden mantener indefinidamente células pluripotenciales al convertirlas en las células especializadas que necesiten. Existen dos tipos básicos de células pluripotenciales. El primero es la célula pluripotencial embrionaria, que se obtiene de fetos abortados o de óvulos fertilizados sobrantes de la fertilización in vitro. Las células pluripotenciales embrionarias se usan para fines médicos y de investigación porque pueden producir células para casi todos los tejidos del cuerpo. El segundo tipo es la célula pluripotenciales adulta, que no es tan versátil para fines de investigación porque sólo puede producir células para determinados tipos de material somático, como la sangre, los intestinos, la piel y los músculos.

Celulasa: Complejo de enzimas que descompone la celulosa en beta glucosa. Se produce principalmente gracias a la acción de bacterias simbióticas presentes en el aparato digestivo de los herbívoros. Con excepción de

los rumiantes, la mayor parte de los animales (incluidos los seres humanos) no produce celulasa, por lo que no pueden aprovechar gran parte de la energía contenida en el material vegetal.

Colágeno: La proteína principal del tejido conjuntivo y la más abundante en los mamíferos. Es el componente principal de ligamentos y tendones.

Corte y empalme: Véase corte y empalme de genes.

Corte y empalme de genes: Aislamiento de un gen de un organismo y su introducción posterior en otro organismo mediante técnicas de biotecnología.

Cosecha tolerante a los herbicidas: Plantas de cosecha creadas para sobrevivir a las aplicaciones de uno o más herbicidas comerciales mediante la incorporación de determinados genes por medios biotecnológicos, tales como la ingeniería genética, o métodos tradicionales de selección, como la mutación natural, química o por radiación.

Cromosomas: Estructura genética de las células que contiene el ADN celular capaz de replicarse a sí misma. Los seres humanos tienen 23 pares de cromosomas.

Cry1A: Proteína derivada de la bacteria Bacillus Thuringiensis, tóxica para algunos insectos cuando la ingieren. Esta bacteria es muy común en la naturaleza y se ha usado durante decenios como insecticida, aunque constituye menos de dos por ciento del total de los insecticidas usados.

Cultivar: En botánica, planta obtenida o seleccionada deliberadamente y mantenida mediante cultivo.

Cultivo de tejidos: Proceso de obtención de una planta en el laboratorio a partir de células en vez de semillas. Esta técnica se utiliza en el cultivo tradicional de plantas y en la biotecnología agrícola.

Derivado de la biotecnología: El uso de la biología molecular o tecnología de ADN recombinante, o transferencia de genes in vitro, para elaborar productos o dotar de características concretas a plantas u otros organismos vivos.

Doble hélice: Estructura en forma de escalera helicoidal que adoptan dos cadenas de ADN cuando nucleótidos complementarios en cadenas opuestas se enlazan.

Estudio del perfil de la expresión genética: Método de análisis de la expresión de miles de genes simultáneamente en una placa de cristal llamada micromatriz.

Expresión genética: Proceso por el cual la información de un gen se convierte en las estructuras y funciones de una célula.

Flujo de genes: Transferencia de genes de una población a otra de la misma especie, como por migración o dispersión de semillas y polen.

Gen: Unidad física y funcional fundamental de la herencia. Un gen es una secuencia ordenada de nucleótidos que ocupan una posición determinada en un cromosoma que codifica un producto funcional concreto, como una proteína o una molécula de ARN.

Genética: Estudio de las leyes de la herencia de determinadas características.

Genoma: Todo el material genético de los cromosomas de un organismo determinado.

Gestión de la resistencia: Estrategias que se pueden emplear para retrasar la aparición de la resistencia. En el caso de los insectos, estas estrategias incluyen el uso de un "refugio" en el que el insecto no está sometido a los efectos del pesticida usado en el resto del campo.

Hélice alfa: Estructura común de proteína que se encuentra, en particular, en el pelo, la lana, las uñas y los cuernos de los animales, y que se caracteriza por una cadena espiral única de aminoácidos estabilizados por enlaces de hidrógeno.

Híbrido: Semilla o planta producida como resultado de polinización cruzada controlada, a diferencia de la resultante de la polinización natural. Las semillas híbridas se seleccionan para que tengan características de mejor calidad (por ejemplo, mayor rendimiento o tolerancia a las plagas).

Ingeniería genética: Técnica para eliminar, modificar o agregar genes a una molécula de ADN con objeto de cambiar la información que contiene. Al cambiar esta información, la ingeniería genética cambia el tipo o la cantidad de proteínas que puede producir un organismo, y de este modo le permite hacer nuevas sustancias o realizar nuevas funciones.

Línea germinal: Línea (secuencia) de células germinales que contienen material genético que se puede transmitir a un hijo.

Maíz Bt: Planta de maíz obtenida mediante biotecnología para que sus tejidos expresen una proteína tóxica para algunos insectos, pero inocua para los seres humanos y otros mamíferos.

Máquina molecular: Ensamblaje de un número diferenciado de componentes moleculares destinados a realizar una función concreta. Cada componente molecular realiza un solo acto, mientras que la estructura supramolecular total realiza una función más compleja, resultante de la cooperación de diversos componentes moleculares.

Mejora genética tradicional: Modificación de plantas y animales mediante la mejora selectiva. Las prácticas usadas en la mejora genética tradicional de plantas pueden incluir aspectos de biotecnología tales como cultivo de tejidos y mejora por mutación.

Mejora selectiva: El cruce o apareamiento deliberado de organismos con objeto de que la progenie tenga una característica deseada derivada de uno de los progenitores.

Moléculas de ADN recombinante (ADNr): Combinación de moléculas de ADN de origen diverso, enlazadas mediante tecnologías de ADN recombinante.

Mutación: Todo cambio en la secuencia del ADN que se pueda heredar.

Nanomedicina: Campo médico que está avanzando rápidamente, en el que los científicos elaboran una gran variedad de nanopartículas y nanodispositivos, de apenas una millonésima de pulgada de diámetro, para mejorar la detección del cáncer, fortalecer las respuestas inmunitarias, reparar tejidos dañados y evitar la arteriosclerosis. A principios de 2005, la Administración de Alimentos y Fármacos de Estados Unidos aprobó una nanopartícula fusionada al medicamento contra el cáncer Taxol, para el tratamiento del cáncer de mama avanzado. En Estados Unidos se está usando con carácter experimental otra nanopartícula en pacientes cardíacos, para mantener abiertas las arterias coronarias después de una operación de angioplastia.

Nanómetro: Milmillonésima parte de un metro.

Nanotecnología: Sistema para transformar la materia, la energía y la información, basado en componentes a escala nanométrica, con características moleculares definidas con precisión. También, las técnicas que producen o miden características de menos de 100 nanómetros de tamaño.

Nucleótido: Componente celular que es uno de los bloques fundamentales de los ácidos ribonucleico (ARN) y desoxirribonucleico (ADN). En los sistemas biológicos, los nucleótidos se enlazan mediante enzimas para formar largos polinucleótidos semejantes a cadenas de secuencia definida.

Organismo modificado genéticamente (OMG): Con frecuencia, la etiqueta OMG y el término "transgénico" se emplean para referirse a organismos que han adquirido genes nuevos de otros organismos mediante métodos de transferencia genética en laboratorios.

Patógeno: Agente causante de enfermedades, en particular un microorganismo vivo, como una bacteria o un hongo.

Péptido: Fragmentos de una proteína, de dos o más aminoácidos en una cadena, semejante a brazaletes de cuentas. Cuando se digieren las proteínas de la carne animal, se descomponen primero en péptidos y luego en sus aminoácidos constitutivos.

Plaguicidas microbianos: Plaguicidas cuyo ingrediente activo es un microorganismo, por ejemplo una bacteria, un hongo o un protozoo. Los plaguicidas microbianos pueden controlar muchos tipos de plagas distintos, aunque cada ingrediente activo está relativamente dirigido contra una plaga concreta. Por ejemplo, algunos hongos controlan determinados tipos de malas hierbas y otros matan a determinados insectos. Los plaguicidas bacterianos más usados son subespecies y cepas del Bacillus thuringiensis, o Bt.

Polen: Células portadoras del ADN masculino de una planta de simiente.

Polimorfismos de nucleótido único (SNP): Relaciones entre genes y poblaciones de prueba para conseguir variaciones en el código genético que puedan aumentar el riesgo de una enfermedad o respuesta determinada a un medicamento.

Productos basados en la biología: Combustibles, productos químicos, materiales de construcción, energía eléctrica o térmica, derivados de materiales biológicos. El término puede incluir cualquier producto energético,

comercial o industrial, distinto de alimentos o piensos, que utilice material biológico o materiales agrícolas (vegetales, animales y marinos) o forestales, domésticos renovables.

Protectores para las plantas (PIP): Anteriormente conocidas como plaguicidas vegetales, son sustancias que actúan como plaguicidas producidos o usados por una planta para protegerse de plagas tales como insectos, virus y hongos.

Proteína de la membrana celular: Molécula proteínica adherida o asociada a la membrana de una célula.

Proteína: Molécula de gran tamaño, compuesta por una o más cadenas de aminoácidos en un orden concreto. El orden está determinado por la secuencia de bases de nucleótidos en el gen que codifica la proteína. Las proteínas son necesarias para la estructura, función y regulación de las células, los tejidos y los órganos del cuerpo, y cada proteína desempeña una función singular. Ejemplos de proteínas son las hormonas, las enzimas y los anticuerpos.

Proteómica: Uso de tecnologías como la espectrometría en masa para detectar marcadores biológicos proteínicos en la sangre que pueden indicar señales tempranas de enfermedades, incluso antes de que aparezcan los síntomas. Uno de estos marcadores es la proteína C reactiva, indicadora de cambios inflamatorios en las paredes de los vasos sanguíneos, que presagian arteriosclerosis.

Reacción en cadena de polimerasa (PCR): Técnica para copiar y ampliar las cadenas complementarias de una molécula determinada de ADN. Es un método in vitro que amplía en alto grado o hace millones de copias de secuencias de ADN que, de otro modo, no podrían ser detectadas o estudiadas.

Recombinación: Proceso por el cual la progenie hereda una combinación de genes distinta de la de sus progenitores.

Resistencia a los plaguicidas: Cambio genético en respuesta a la selección por un plaguicida que da por resultado la formación de cadenas capaces de sobrevivir a una dosis letal a una mayoría de individuos en una población normal. La resistencia se puede producir en insectos, malas hierbas y patógenos.

Selección natural: Concepto ideado por Charles Darwin, según el cual, los genes que producen las características más favorables en un entorno determinado serán más abundantes en la generación siguiente.

Tecnología de ADN recombinante: Procedimiento usado para unir segmentos de ADN en un sistema acelular (entorno situado fuera de una célula u organismo). En condiciones apropiadas, una molécula de ADN recombinante puede entrar en una célula y replicarse allí, bien sea de manera autónoma, o después de haberse integrado en un cromosoma celular.

Terapia genética: Técnica médica experimental consistente en la inserción de genes en las células y los tejidos de un individuo para tratar una enfermedad. Normalmente, un gen defectuoso se reemplaza por otro que funciona normalmente. En la mayoría de los casos, el gen normal se introduce en los tejidos mediante un adenovirus alterado genéticamente para asegurar su inocuidad.

Transferencia de genes: Técnica común en biología molecular para provocar un cambio genético mediante la toma y recombinación de ADN.

Transgénico: Organismo que contiene genes modificados por la inserción de ADN de un organismo extraño; se produce cuando genes extraídos de una especie se insertan en otra especie para obtener una característica determinada expresada en la progenie.

Variedad: Subdivisión de una especie para su clasificación taxonómica. Usado como sinónimo del término "cultivar", designa a un grupo de individuos genéticamente distinto de otros grupos de individuos de la misma especie. Una variedad agrícola es un grupo de plantas similares que, por sus características estructurales y comportamiento, puede distinguirse de otras variedades de la misma especie.

Virus: Entidad biológica no celular que sólo puede reproducirse dentro de una célula huésped. Los virus consisten en ácido nucleico recubierto de proteína; algunos virus animales también están recubiertos de una membrana. Dentro de la célula infectada, el virus se vale de la capacidad sintética del huésped para su replicación. ■

Fuentes: *Agricultural Biotechnology: Informing the Dialogue.* Colegio de Agricultura y Ciencias Biológicas de Cornell University: Ithaca, NY. 2003; *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms.* sexta ed. New York y Chicago: McGraw-Hill, 2002; Nill, Kimball R. Glossary of *Biotechnology Terms.* tercera ed. Boca Ratón, FL: CRC Press, 2002; *Wikipedia* en http://en.wikipedia.org/; *The McGraw-Hill Encyclopedia of Science & Technology Online* en http://www.accessscience.com/Encyclopedia.

BIBLIOGRAFÍA (EN INGLÉS)

Acquaah, George. *Understanding Biotechnology: An Integrated and Cyber-Based Approach.* Upper Saddle River, NJ: Pearson/ Prentice Hall, 2004.

Bailey, Ronald. *Liberation Biology: The Scientific and Moral Case for the Biotech Revolution.* Amherst, NY: Prometheus Books, 2005.

Barnum, Susan R. *Biotechnology: An Introduction.* 2nd ed. Belmont, CA: Thomson/Brooks/Cole, 2005.

Chrispeels, Maarten J. and David E. Sadava. *Plants, Genes, and Crop Biotechnology.* 2nd ed. Boston, MA: Jones and Bartlett, 2003.

Colwell, Rita. Testimony Before the U.S. House of Representatives Committee on Science Research Subcommittee, 12 June 2003. http://www.house.gov/science/hearings/research03/jun12/colwell.htm

Eicher, Carl K., Karim Maredia and Idah Sithole-Niang. *Biotechnology and the African Farmer.* Staff Paper 2005-08. East Lansing, MI: Michigan State University Press, 2005. http://agecon.lib.umn.edu/cgi-bin/pdf_view.pl?paperid=16821&ftype=.pdf

Farm Foundation. *Economics of Regulation of Agricultural Biotechnologies.* Issue Report; August 2005. Oak Brook, IL: Farm Foundation, 2005. http://www.farmfoundation.org/Issue%20Reports/documents/August2005ISSUEREPORTFINAL.pdf

Fedoroff, Nina V. and Nancy M. Brown. *Mendel in the Kitchen: A Scientist's View of Genetically Modified Foods.* Washington, DC: Joseph Henry Press, 2004.

Freidberg, Susanne. *French Beans and Food Scares: Culture and Commerce in an Anxious Age.* New York, NY: Oxford University Press. 2004.

Fumento, Michael. *BioEvolution: How Biotechnology Is Changing Our World.* San Francisco, CA: Encounter Books, 2003.

Goodsell, David S. *Bionanotechnology: Lessons From Nature.* Hoboken, NJ: Wiley-Liss, 2004.

Grace, Eric S. *Biotechnology Unzipped: Promises and Realities.* Rev. 2nd ed. Washington, DC: Joseph Henry Press, 2005.

Huang, Jikun, Scott Rozelle, Carl Pray and Qinfang Wang. "Plant Biotechnology in China." *Science,* vol. 295, 25 January 2002, pp. 674-676.

Kreuzer, Helen and Adrianne Massey. *Biology and Biotechnology: Science, Applications, and Issues.* Washington, DC: ASM Press, 2005.

Loffler, Alicia, ed. *Kellogg on Biotechnology: Thriving Through Integration.* Evanston, IL: Northwestern University Press; London: Kogan Page, 2005.

Miller, Henry I. and Gregory Conko. *The Frankenfood Myth: How Protest and Politics Threaten the Biotech Revolution.* New York, NY: Praeger, 2004.

Pray, Carl, Jikun Huang, Ruifa Hu and Scott Rozelle. "Five Years of Bt Cotton in China: The Benefits Continue." *Plant Journal,* vol. 31, no. 4, August 2002, pp. 423-430.

President's Council of Advisors on Science and Technology. *The National Nanotechnology Initiative at Five Years: Assessment and Recommendations of the National Nanotechnology Advisory Panel.* Washington, DC: President's Council of Advisors on Science and Technology, 2005. http://nano.gov/FINAL%5FPCAST%5FNANO%5FREPORT.pdf

Shetty, Kalidas, ed. *Food Biotechnology.* 2nd ed. New York: Dekker/CRC Press, 2005.

Shmaefsky, Brian. *Biotechnology in the Farm and Factory: Agricultural and Industrial Applications.* Philadelphia, PA: Chelsea House Publishers, 2005.

Smith, John E. *Biotechnology.* 4th ed. Cambridge, NY: Cambridge University Press, 2004.

Winston, Mark L. *Travels in the Genetically Modified Zone.* Cambridge, MA: Harvard University, 2004.

Wu, Felicia and William Butz. *The Future of Genetically Modified Crops: Lessons From the Green Revolution.* Santa Monica, CA: RAND, 2004. http://www.rand.org/publications/MG/MG161/

Zhao, Xiaojun and Shuguang Zhang. "Fabrication of Molecular Materials Using Peptide Construction Motifs." *Trends in Biotechnology,* vol. 22, no. 9, September 2004, pp. 470-476.

RECURSOS EN INTERNET (EN INGLÉS)

U.S. GOVERNMENT

National Library of Medicine
National Center for Biotechnology Information
http://www.ncbi.nlm.nih.gov/

National Nanotechnology Initiative
http://www.nano.gov/

U.S. Department of Agriculture

Animal Plant and Health Inspection Service
Biotechnology Regulatory Services
http://www.aphis.usda.gov/brs/index.html

Economic Research Service
Economic Issues in Agricultural Biotechnology
http://www.ers.usda.gov/publications/aib762/

United States Regulatory Oversight in Biotechnology Responsible Agencies
http://www.aphis.usda.gov/brs/usregs.html#usda

U.S. Department of State
Bureau of International Information Programs
http://www.usinfo.state.gov/ei/economic_issues/biotechnology.html

U.S. Environmental Protection Agency
Toxic Substances Control Act Biotechnology Program
http://www.epa.gov/opptintr/biotech/index.html

U.S. Food and Drug Administration
Center for Food Safety and Applied Nutrition
http://www.cfsan.fda.gov/~lrd/biotechm.html

U.S. Regulatory Agencies Unified Biotechnology Web Site
http://usbiotechreg.nbii.gov

ACADEMIC AND RESEARCH INSTITUTIONS

AgBioWorld
http://www.agbioworld.org

Agricultural Biology Communicators
U.S. Land Grant Colleges and Universities
http://agribiotech.info/

American Institute of Biological Sciences
http://www.actionbioscience.org/index.html

American Phytopathological Society
http://www.apsnet.org/media/ps/

Center for Global Food Issues
http://www.cgfi.com

Cornell University
http://www.nysaes.cornell.edu/agbiotech

Council for Agricultural Science and Technology
http://www.cast-science.org

Donald Danforth Plant Science Center
http://www.danforthcenter.org/

Foresight Nanotech Institute
http://www.foresight.org/

Information Systems for Biotechnology
http://www.isb.vt.edu

International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications
http://www.isaaa.org/

Iowa State University
http://www.biotech.iastate.edu/

National Agricultural Biotechnology Council
http://www.cals.cornell.edu/extension/nabc

Pew Initiative on Food and Biotechnology
http://www.pewagbiotech.org

University of California Biotechnology Program
http://ucbiotech.org/

University of Maryland

Medical Biotechnology Center
http://www.umbi.umd.edu/~mbc/

Agricultural Biotechnology
http://agnic.umd.edu/

INDUSTRY

AGBIOS
http://www.agbios.com/main.php

Biotech Knowledge Center
http://www.biotechknowledge.com

Biotechnology Industry Organization
http://www.bio.org/

Council for Biotechnology Information
http://www.whybiotech.com/

CropLife America
http://www.croplifeamerica.org

INTERNATIONAL ORGANIZATIONS

Consultative Group on International Agricultural Research
http://www.cgiar.org

EUROPA
(European Commission)
http://www.europa.eu.int/comm/food/food/biotechnology/index_en.htm

European Food Safety Authority
http://www.efsa.eu.int/science/gmo/catindex_en.html

Food and Agriculture Organization
http://www.fao.org/biotech

International Food Policy Research Institute
http://www.ifpri.org/themes/biotech/biotech.htm

International Rice Research Institute
http://www.irri.cgiar.org

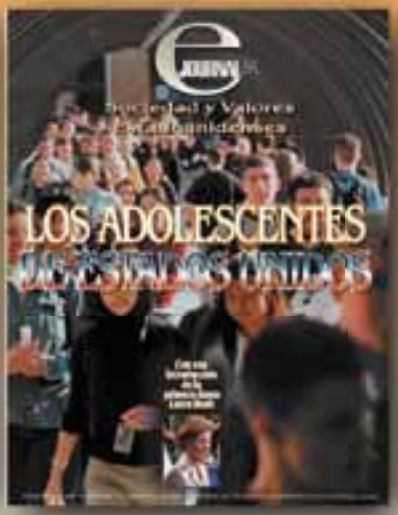
International Service for National Agricultural Research
http://www.isnar.cgiar.org/kb/Bio-index.htm

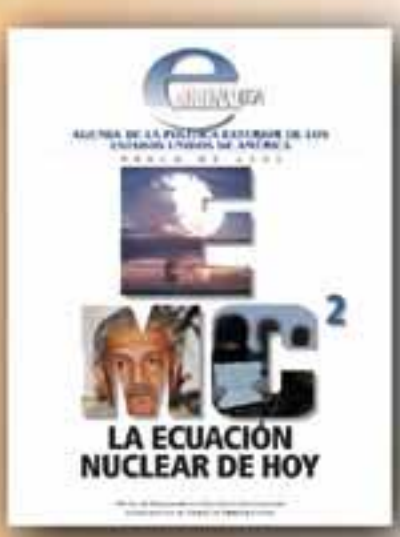
Organization for Economic Cooperation and Development
h
1_1_37437,00.html

World Health Organization
http://www.who.int/foodsafety/biotech/en/

World Intellectual Property Organization
http://www.wipo.int/tk/en/genetic/index.html

El Departamento de Estado de Estados Unidos no asume responsabilidad por el contenido o la disponibilidad de los recursos de los organismos y organizaciones que figuran arriba. Todos los enlaces de Internet estaban activos a fecha de octubre de 2005.





Un periódico electrónico mensual que se publica en varios idiomas

CONSULTE LA LISTA COMPLETA DE TÍTULOS EN EL SITIO
http://usinfo.state.gov/journals/jourspa.htm