

IICA



PROSPECTIVA
DE LAS AGROBIOTECNOLOGIAS

Rodolfo Quintero

INSTITUTO INTERAMERICANO DE
COOPERACION PARA LA AGRICULTURA

IICA
BIBLIOTECA
BOGOTA - COLOMBIA

¿QUE ES EL IICA?

El Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) es el organismo especializado en agricultura del Sistema Interamericano. Sus orígenes se remontan al 7 de octubre de 1942 cuando el Consejo Directivo de la Unión Panamericana aprobó la creación del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas.

Fundado como una institución de investigación agronómica y de enseñanza de posgrado para los trópicos, el IICA, respondiendo a los cambios y a las nuevas necesidades del hemisferio, se convirtió progresivamente en un organismo de cooperación técnica y fortalecimiento institucional en el campo agropecuario. Estas transformaciones fueron reconocidas formalmente con la ratificación, el 8 de diciembre de 1980, de una nueva convención, la cual estableció como los fines del IICA estimular, promover y apoyar los lazos de cooperación entre sus 33 Estados Miembros para lograr el desarrollo agrícola y el bienestar rural.

Con un mandato amplio y flexible y con una estructura que permite la participación directa de los Estados Miembros en la Junta Interamericana de Agricultura (JIA) y en su Comité Ejecutivo, el IICA cuenta con una amplia presencia geográfica en todos los países miembros para responder a sus necesidades de cooperación técnica.

Los aportes de los Estados Miembros y las relaciones que el IICA mantiene con 16 Observadores Permanentes, y con numerosos organismos internacionales, le permiten canalizar recursos humanos y financieros en favor del desarrollo agrícola del hemisferio.

El Plan de Mediano Plazo 1987-1993, documento normativo que señala las prioridades del Instituto, enfatiza acciones dirigidas a la reactivación del sector agropecuario como elemento central del crecimiento económico. En función de esto, el Instituto concede especial importancia al apoyo y promoción de acciones tendientes a la modernización tecnológica del agro y al fortalecimiento de los procesos de integración regional y subregional. Para lograr esos objetivos el IICA concentra sus actividades en cinco Programas que son: Análisis y Planificación de la Política Agraria; Generación y Transferencia de Tecnología; Organización y Administración para el Desarrollo Rural; Comercio e Integración; y Sanidad Agropecuaria.

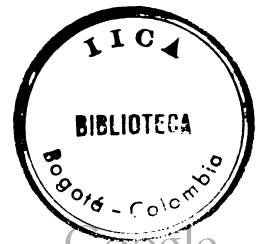
Los Estados Miembros del IICA son: Antigua y Barbuda, Argentina, Barbados, Belice, Bolivia, Brasil, Canadá, Chile, Colombia, Costa Rica, Dominica, Ecuador, El Salvador, Estados Unidos de América, Grenada, Guatemala, Guyana, Haití, Honduras, Jamaica, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, República Dominicana, St. Kitts y Nevis, Santa Lucía, San Vicente y las Granadinas, Suriname, Trinidad y Tobago, Uruguay y Venezuela. Funcionan como Observadores Permanentes: Alemania, Austria, Bélgica, Comunidades Europeas, España, Federación de Rusia, Francia, Hungría, Israel, Italia, Japón, Portugal, Reino de los Países Bajos, República Árabe de Egipto, República de Corea y Rumania.



PROSPECTIVA DE LAS AGROBIOTECNOLOGIAS

Rodolfo Quintero

34 Marzo, 1993
SERIE DOCUMENTOS DE PROGRAMAS



© Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
Marzo, 1993.

Derechos reservados. Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin autorización escrita del IICA.

Las ideas y planteamientos contenidos en los artículos firmados son propios de los autores y no representan necesariamente el criterio del IICA.

El Centro Interamericano de Documentación e Información Agrícola (CIDIA), a través de su Servicio Editorial e Imprenta, es responsable por la revisión estilística, levantado de texto, montaje, fotomecánica e impresión de esta publicación.

Quintero, Rodolfo

Prospectiva de las agrobiotecnologías / Rodolfo Quirós Quintero. — San José, C.R. : Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Programa de Generación y Transferencia de Tecnología, 1993.

164 p. ; 25 cm. — (Serie Documentos de Programas / IICA, ISSN 1011-7741 ; no. 34)

1. Biotecnología. I. IICA. Programa de Generación y Transferencia de Tecnología. II. Título. III. Serie.

AGRIS F02

DEWEY 631.523

SERIE DOCUMENTOS DE PROGRAMAS no. 34
ISSN 1011-7741

2204
SDR-34
1993

INDICE

PRESENTACION	5
RESUMEN	8
SUMMARY	11
1. INTRODUCCION	15
Evolución de la biotecnología	16
Agrobiotecnología moderna	18
2. METODOLOGIA DE LA PROSPECTIVA	25
Proceso de búsqueda como activador de un dominio	27
Proceso de búsqueda como forma de inquirir	28
Fase de la prospectiva	29
3. NIVEL ACTUAL DE LA AGROBIOTECNOLOGIA: AVANCE CIENTIFICO Y APLICACIONES	34
Descripción de las principales agrobiotecnologías	34
Aplicaciones de las agrobiotecnologías	50
4. ESTUDIOS PROSPECTIVOS EN AGROBIOTECNOLOGIA	59
Introducción	59
Prospectiva en agrobiotecnología	64
5. PROSPECTIVA DE LA AGROBIOTECNOLOGIA COMO HERRAMIENTA DE PLANEACION EN AMERICA LATINA	84
Importancia de los estudios prospectivos	84
Tipos de estudios prospectivos	86
Prospectiva en la planeación	95
Conclusiones y recomendaciones	98

This One



9JXP-ZW2-DC6F

BIBLIOGRAFIA	101
APENDICE A. AVANCES EN BIOLOGIA MOLECULAR VEGETAL	107
Introducción	107
T DNA del plásmido Ti de <i>A. tumefaciens</i> como vector de transformación	108
Otros métodos utilizados para la transformación de células vegetales	112
Ingeniería genética de caracteres y secuencias genéticas con potencial en biotecnología agrícola	117
Análisis genético de caracteres multigénicos	126
BIBLIOGRAFIA APENDICE A	127
APENDICE B. AVANCES EN LAS TECNICAS DE CULTIVO DE TEJIDOS VEGETALES	133
Introducción	133
Regeneración	135
Multiplicación de yemas axilares	140
Embriogénesis somática directa o vía callo	141
Cultivo de anteras y granos de polen	145
Regeneración a partir de protoplastos	146
Variación somaclonal y micropropagación	147
Cultivo de raíces	149
Avances recientes en el cultivo de tejidos	152
Perspectivas del cultivo de tejidos vegetales	157
BIBLIOGRAFIA APENDICE B	161

PRESENTACION

La biotecnología, aunque constituye una disciplina todavía en ciernes, ha ganado reconocimiento y atención crecientes a causa de los efectos actuales y potenciales en los países industrializados y en los países en desarrollo. Junto a otras áreas novedosas de la actividad productiva —materiales, telemática, computación, entre otras—, constituye la base de un nuevo paradigma tecnológico, del cual se espera una modificación profunda de la sociedad moderna. La biotecnología constituye un nuevo jalón en el desarrollo económico del siglo XX, caracterizado por la aplicación de novedosos conocimientos científicos en la esfera productiva y por la preeminencia del conocimiento y la información como factores de producción.

El descubrimiento de la estructura del ADN (ácido desoxiribonucleico), en 1953, despejó el camino para la manipulación genética de los organismos vivos en el nivel molecular. Ello fue más evidente a partir de 1973 cuando se produjo la primera clonación de un gen por medio de la ingeniería genética. A partir de entonces, la aplicación de la biología a los procesos productivos adquirió una considerable importancia, ruta que la física y la química emprendieron mucho antes, dando origen a productos e industrias característicos del mundo moderno: acero, plástico o petroquímica.

Diversos autores han señalado que el nuevo paradigma tecnológico, del cual la biotecnología forma parte, redefinirá los flujos de comercio, las instituciones y las relaciones entre las naciones en un mundo cada vez más cercano a lo que se denomina la "aldea global". Los países en desarrollo no pueden ser simples espectadores de esos adelantos tecnológicos. En primer lugar, el no utilizar ni generar tales tecnologías puede significar para ellos perder una importante y estratégica oportunidad de desarrollo. En segundo lugar, a pesar de que las agrobiotecnologías, como todos los cambios, traen nuevas oportunidades, no debe olvidarse que ellas pueden constituir amenazas para el desarrollo económico de los países de América Latina y el Caribe (ALC), en su mayoría importantes exportadores de productos agrícolas. En ese

sentido, el impacto del desarrollo de edulcorantes alternativos sobre el comercio internacional de azúcar constituye una alerta.

En consecuencia, para impulsar la adaptación y generación de las agrobiotecnologías, es imprescindible el fortalecimiento de las capacidades de planificación y gestión en ALC en los sectores público y privado de la región. Para ello es urgente disponer de información, metodologías y conceptos adecuados; y realizar estudios de prospectiva tecnológica, de análisis del impacto socioeconómico, de los instrumentos de la política y gestión científico-tecnológica al nivel de las empresas.

Consciente de la importancia de la biotecnología, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) ha desarrollado una serie de actividades de apoyo a los países de ALC hacia la definición de políticas apropiadas y su promoción. Se han emprendido acciones referentes al diagnóstico de las capacidades existentes en la región, en cuanto a la adaptación y generación de éstas; a la prospectiva global de su evolución; al monitoreo de su posible impacto en la agricultura regional; y a la formulación de políticas para crear un clima de inversión y de desarrollo industrial adecuado.

Estas acciones están comprendidas en el Proyecto de Planeamiento Estratégico y Nuevas Opciones Tecnológicas, adscrito al Programa de Generación y Transferencia de Tecnología, y cuenta con el apoyo del Gobierno de Canadá.

Esta publicación **Prospectiva de las Agrobiotecnologías**, dentro de la Serie Documentos de Programas del IICA, es el resultado de una consultoría realizada por el Dr. Rodolfo Quintero, y forma parte de una programación más amplia de acciones de cooperación con los países miembros del Instituto, tendentes a apoyar la formulación de políticas apropiadas para la difusión y la generación de agrobiotecnologías.

En ella se analizan los principales rasgos de la evolución global de las nuevas agrobiotecnologías, partiendo de una discusión metodológica de la prospección tecnológica en sí. También se discuten, en detalle, los aspectos técnicos y posibles escenarios futuros de la biotecnología y los impactos económicos derivados de estos desarrollos. Es importante destacar el valor de este trabajo, no sólo como un compendio actualizado de la evolución de esta novedosa área y su prospectiva, sino también como una guía metodológica para estudios futuros en los países, adaptados a sus necesidades específicas de monitoreo y planificación.

Hay que dejar constancia de nuestro agradecimiento a la Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional (ACDI), por la cooperación técnica y financiera proporcionada al IICA, sin la cual esta publicación no hubiese sido posible.

Eduardo J. Trigo
Director
Programa de Generación y Transferencia
de Tecnología, IICA

RESUMEN

El potencial de la biotecnología ha creado enormes expectativas en los países industrializados desde mediados de la séptima década. Si bien se han cumplido algunas de las promesas, la aplicación de la biotecnología a procesos productivos no ha mostrado la celeridad esperada una década atrás. Es aún incierto si ella dará lugar a un cambio importante en la estructura de la oferta de los sectores agrícola y farmacéutico, los cuales, se estima, serán los mayores beneficiarios de la utilización de las nuevas técnicas biotecnológicas. Se predice que para el año 2000 los sectores que habrán sentido mayor influencia de la biotecnología, en términos de procesos como de productos, serán la agricultura, la ganadería, la salud humana y los alimentos.

Prospectar se define como "mirar hacia adelante; imaginar razonadamente lo que podría ocurrir en el futuro; anticipar posibles riesgos y oportunidades". La prospectiva tiende a tener mayor demanda cuando se percibe que el futuro podría no ser igual que el pasado; cuando la velocidad de los cambios crece; y cuando la acumulación de los hechos puede tener un impacto mayor que la de su mera suma individual. Lo anterior describe la situación del cambio tecnológico en el siglo XX, particularmente en sus postrimerías, con la generación de un nuevo paradigma tecnológico, conformado por los denominados nuevos materiales, las biotecnologías, la computación y la telemática. Dados los impactos potenciales de las nuevas agrobiotecnologías, es importante utilizar la prospectiva como una herramienta para determinar los posibles impactos de esas técnicas en ALC, y sugerir estrategias que permitan su adopción y generación, a partir de lo cual se pueda impulsar su inserción más favorable en la economía mundial.

Es posible agrupar las diferentes técnicas biotecnológicas de diversas maneras. Una de ellas, de acuerdo con el nivel o estructura modificado en el organismo sobre el cual se trabaja. Se obtienen así tres grupos de técnicas, según el objeto alterado: organismo, célula o molécula. Otra clasificación posible es la siguiente: ingeniería genética, anticuerpos monoclonales, cultivo de tejidos y fusión celular, y biosíntesis de metabolitos secundarios.

Se identifican, entre otras, las siguientes áreas de investigación biotecnológica, relacionadas con el sector agropecuario: aumento de la biomasa vegetal y de la productividad animal; propagación clonal de diversas variedades; incremento en la velocidad de los cambios genéticos; resistencia a enfermedades y determinación del sexo en animales.

Específicamente, se espera un fuerte impacto de la ingeniería genética en la producción de semillas mejoradas por técnicas biotecnológicas —con mayor resistencia al estrés ambiental. Se estima que su venta será de unos cuatro mil millones de dólares estadounidenses a principios de la próxima década. Las aplicaciones biotecnológicas a la ganadería son más diversas e incluyen medicina animal y síntesis de hormonas naturales de crecimiento, inocuas para el ser humano, y otras.

La revisión de la literatura muestra que los estudios prospectivos no son abundantes. El número de los que se refieren específicamente a las agrobiotecnologías es aún menor. Además, aquéllos se han caracterizado por utilizar metodologías poco sofisticadas, y es de esperar que los análisis tengan divergencia en su alcance y enfoque.

Si se acepta que las agrobiotecnologías se desarrollarán y aplicarán masivamente en los próximos diez o quince años, entonces es necesario conocer anticipadamente en qué productos y procesos se darán los mayores cambios, cuándo sucederán y cuáles efectos tendrán en las economías latinoamericanas: sustitución de exportaciones, aumento de importaciones, modificación de la estructura productiva y organizativa de la agricultura, entre otros. Es particularmente importante para ALC cuestionar no sólo las áreas de investigación que se están desarrollando, sino también cuáles productos agrícolas son de su interés para ALC y que no se encuentran en la agenda de investigación de los países industrializados. Por ejemplo, se ha determinado que la agricultura de temporal y la agricultura del trópico no son áreas prioritarias para los países que se encuentran a la cabeza de la

investigación agrobiotecnológica. Los estudios prospectivos también tienen un importante papel que cumplir, como llamados de alerta y constructores de consenso para que donantes, instituciones de financiamiento y gobiernos destinen recursos al desarrollo de las biotecnologías en la región.

Pese a su importancia, no existe un sólo estudio de carácter prospectivo de la biotecnología con énfasis en ALC. Las metodologías diseñadas para la prospección proceden de naciones industrializadas, por lo que no se adaptan a las condiciones de los países latinoamericanos. Por ejemplo, en estos países, la extrapolación de tendencias se dificulta grandemente debido a la carencia de estadísticas adecuadas; tampoco hay en ellos suficiente cantidad de expertos en ciertos tópicos a quienes consultar, entre otros.

Los estudios prospectivos que se realicen en la región deberán revisar el nivel de conocimiento, tanto en el contexto internacional, pero también en ALC. Los relevamientos de información muestran que la investigación biotecnológica es incipiente en la región: cuarenta por ciento de los investigadores no poseen estudios de posgrado; cuatro quintas partes de los centros investigan en cultivo de tejidos y sólo el veintitrés por ciento se especializa en biología molecular. La investigación biotecnológica aplicada a la producción animal se encuentra limitada a la fertilización, transferencia de embriones, producción de sistemas de diagnóstico y algunos esfuerzos en la producción de vacunas. Adicionalmente, la escasez de recursos constituye una grave restricción que debe ser superada.

SUMMARY

The potential of biotechnology has generated enormous expectations in the industrialized countries since the mid-1970s. While some of the promise has been realized, the application of biotechnology to production processes has not occurred as rapidly as was predicted a decade ago. It is still unclear whether biotechnology will bring about major changes in the structure of the supply of the agricultural and pharmaceutical sectors, which, it is believed, are the ones that stand to benefit the most from new biotechnological techniques.

The word prospective can be defined as "forward looking; a reasoned imagination of what may occur in the future; anticipating possible risks and opportunities." There is a greater need for a prospective outlook when it is expected that the future will differ from the past; when there is an increase in the velocity of change; and when the accumulation of occurrences has a greater impact than the mere sum of individual occurrences. This describes the situation of technological change in the twentieth century, particularly the latter part, which has witnessed the generation of a new technological paradigm consisting of the so-called new materials, the biotechnologies, the computer sciences and telematics. Given the potential impact of the new agrobiotechnologies, a prospective analysis can be used as a useful tool for estimating the possible impact of these technologies in Latin America and the Caribbean (LAC), and for suggesting strategies for fostering the adoption and generation of same, so that LAC can achieve a more satisfactory position in the world economy.

The different biotechnological techniques can be grouped in various ways, depending on the criteria used. One way is to group techniques by the level or structure of the organism modified. This gives rise to three groups of techniques, applicable to organisms, cells or molecules. Another system of classification is as follows: genetic engineering, monoclonal antibodies, tissue culture and cellular fusion, and biosynthesis of secondary metabolites.

The following are some of the areas of biotechnological research associated with the agricultural sector: increasing plant biomass and animal productivity; clonal propagation of different varieties; increasing the velocity of genetic change; improving resistance to disease and determining the sex of animals.

More specifically, genetic engineering is expected to have a strong impact on the production of improved seeds having greater resistance to environmental stress, using biotechnological techniques. It is estimated that the sale of such seed will generate some US\$4 billion by early in the next decade. Biotechnological applications in livestock are more diverse and include animal medicine, synthesis of natural growth hormones not hazardous to human health, and others.

An examination of literature on the subject shows that few prospective studies have been carried out, and those dealing specifically with the agrobiotechnologies are even fewer. Furthermore, the studies available have generally been characterized by the use of relatively unsophisticated methods, and they have not been consistent in scope or approach.

If we assume that there will be massive development and application of agrobiotechnologies in the coming ten or fifteen years, then we must try to determine in advance what products and processes will undergo the greatest change, when this will take place, and what effect this will have on Latin American economies: decreased demand for LAC exports, increased imports, changes in the production structure and organization of agriculture, among others. It is of particular importance for LAC to ascertain not only what areas of research are being developed, but also what agricultural products are of interest to LAC but are not on the research agenda of industrialized countries. For example, it has been determined that dry-land farming and tropical agriculture are not of priority in countries at the vanguard of agrobiotechnological research. Prospective studies can also play an important role in alerting and building consensus to encourage donors, lending

institutions and governments to channel resources to the development of biotechnologies in the region.

Despite the evident importance of such an endeavor, not a single prospective analysis has been made of biotechnology with an emphasis on LAC. Because most forecasting methods are designed in the industrialized countries, they are not adaptable to conditions in Latin American countries. For example, extrapolation of trends is hindered considerably by a lack of a suitable body of statistical information. In addition, there is a shortage of experts in the various areas of biotechnology for conducting this type of analysis.

Prospective studies carried out in the region should examine the state of the art at both the international and the LAC levels. Information surveys indicate that biotechnological research is incipient in the region: 40% of the researchers do not have post-graduate degrees; 80% of the centers study tissue culture and only 23% specialize in molecular biology. Biotechnological research applied to animal production is limited to fertilization, embryo transfer, production of diagnostic kits, and some efforts to produce vaccines. Finally, the shortage of resources is a severe limitation which must be overcome.

INTRODUCCION

Pensar sobre el futuro de un asunto cualquiera o sobre la futura ocurrencia de algún evento no es tarea fácil; menos cuando se trata de hacerlo a largo plazo. Aún más, reflexionar sobre el futuro puede resultar incómodo, por ejemplo, porque al hacerlo imaginamos que pueden ocurrir eventos que no nos agraden; o simplemente porque tratar lo incierto nos deja "mal sabor de boca". Cuando reflexionamos sobre el futuro, estamos imaginando, y sólo podemos inventarlo; la gracia del asunto es hacerlo educada y razonablemente.

En este trabajo se realiza un análisis prospectivo sobre las agrobiotecnologías, evaluando su posible impacto en el contexto latinoamericano, y se presentan algunas opciones estratégicas sobre cómo aprovechar los cambios tecnológicos que se están dando en el mundo.

Los países latinoamericanos se encuentran en una posición difícil en lo relativo a su crecimiento y desarrollo económico y social, ya que las llamadas ventajas comparativas que hasta ahora habían constituido su base —mano de obra barata, disponibilidad de materias primas, mínima regulación fiscal, ecológica, entre otros— están dejando de serlo, como consecuencia de las modificaciones en la economía global.

Debido a esta nueva tendencia, las ventajas en el comercio de cada país ya no se definen según la abundancia y el costo relativo de los factores tradicionales (mano de obra y capital, o de ciertos recursos específicos) sino por su capacidad tecnológica para reproducir y vender productos nuevos o por lo menos diversificados (Office of Technology Assessment of the US Congress 1984).

El desarrollo de numerosas tecnologías basadas en las ciencias está revolucionando los modos de producir: la microelectrónica, la informática, la biotecnología y la producción de materiales de propiedades especiales, entre otras, modifican muchas veces, en un proceso de transformación rápido y fluido, la intensidad relativa del uso del capital y de la mano de obra en los sectores productivos.

De esta manera, las ventajas comparativas de la región en mano de obra y recursos naturales están siendo erosionadas por la introducción de nuevas tecnologías en los países desarrollados. Por lo tanto es indispensable interpretar correctamente la dirección e intensidad de tales transformaciones

tecnológicas y definir acciones necesarias para apoyar las actividades internas, con el fin de que puedan responder adecuadamente a la nueva situación y den lugar a una estructura de exportaciones más diversificada y dinámica.

Evolución de la biotecnología

La biotecnología es percibida hoy como uno de los sectores tecnológicos claves en el desarrollo industrial contemporáneo. Ella estará en el origen de un nuevo ciclo largo de la economía occidental y en la génesis de una nueva era industrial (Bull, Holt y Lilly 1982).

El creciente interés que, en los últimos, años ha despertado la biotecnología, tanto en los medios académicos como en la actividad económica, se ha traducido, entre otras, en una proliferación de definiciones.

La biotecnología es, según una de las definiciones más aceptadas,

«...la aplicación de los principios científicos y de ingeniería al tratamiento de los materiales, por los agentes biológicos, para producir bienes y servicios» (Bull, Holt y Lilly 1982).

En otras palabras: El empleo de organismos vivos, o de sus componentes, en procesos productivos; principalmente mediante la manipulación del propio material genético.

Si bien el uso de biotecnologías (microorganismos básicamente) no es nuevo, con el desarrollo de la biología molecular y la bioquímica durante las últimas tres décadas se inician ahora desconocidas posibilidades de aplicaciones de estas técnicas.

En el Cuadro 1 se puede apreciar la evolución histórica de la biotecnología. Se destaca cómo en los últimos 17 años la biotecnología moderna y, en particular, la agrobiotecnología ha tenido un rápido y creciente desarrollo. También es evidente que sus impactos se sentirán verdaderamente a mediados y finales de la presente década.

La aplicación de la biotecnología en cualquier organismo vivo, genera posibilidades de uso en los más diversos casos, incluyendo a la industria químico-farmacéutica, la energía, la agricultura y la ganadería, entre otros. Ello ha dado lugar a nuevos productos, al mejoramiento de los procesos de producción de bienes ya existentes, o bien a la sustitución de procesos tradicionales por nuevos procedimientos, basados en ingeniería genética y en otras técnicas biotecnológicas.

Cuadro 1. Evolución histórica de la biotecnología.

Año	Principales aplicaciones
2000 a.C.	Vino, pan, fermentación de productos lácteos. Fermentación alcohólica.
1870	Producción de vacunas.
1900	Acidos orgánicos, solventes.
1950	Antibióticos, vitaminas.
1953	Modelo de la doble hélice para ADN.
1960	Aminoácidos, enzimas, vacunas.
1973	Clonación del primer gen por ingeniería genética.
1975	Primer anticuerpo monoclonal.
1976	Creación de la primera empresa de biotecnología.
1981	Aprobación del uso de anticuerpos monoclonales para diagnóstico.
1983	Insulina humana. Transformación de vegetales por ingeniería genética.
1988	Nueve productos de uso terapéutico humano. Doscientos sistemas de diagnóstico por medio de la utilización de anticuerpos monoclonales. Pruebas de campo con especies vegetales modificadas genéticamente.
1990	Aproximadamente operan mil empresas biotecnológicas en los países industrializados.
2000	Cien nuevos productos de uso terapéutico humano. Semillas de cultivos básicos transformadas genéticamente. Nuevos agroquímicos. Nuevos materiales y productos químicos.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

La amplitud del potencial de las aplicaciones ha creado enormes expectativas en los países industrializados, respecto del desarrollo de la bioindustria desde mediados de la década pasada. Si bien algunas de las promesas se han cumplido, la explotación económica de la biotecnología no ha tenido aún el despegue esperado. También es incierto si ella dará lugar a un cambio importante en la estructura de la oferta de los sectores que más se beneficiarán con su uso, como son el farmacéutico y el agrícola (Sasson 1988).

En términos estrictos, la biotecnología no representa nada nuevo, ya que tanto la utilización de microorganismos en los procesos de fermentación tradicionales, así como las prácticas empíricas de selección genética y de hibridación, se han usado a lo largo de la historia del Hombre.

Esto ha llevado a distinguir entre biotecnología tradicional y nueva biotecnología. Equivocadamente se tiende a asociar los procesos de fermentación con la primera, y a la ingeniería genética con la segunda, cuando en realidad la biotecnología está constituida por el conjunto de técnicas que permiten el manejo de los seres vivos y de sus componentes.

Agrobiotecnología moderna

En el año 1973, un grupo de investigadores de la Universidad de California logró introducir, por primera vez, en una bacteria un gen construido químicamente y hacer que éste fuese reconocido y procesado como propio, logrando que la bacteria produjese una hormona humana, la somatostatina.

Diez años después, otro grupo de investigadores de la Universidad de Gante, en Bélgica, logró transferir el gen de una bacteria a una planta y, por ese mecanismo, la planta se hizo resistente a insectos, ya que podía producir una sustancia tóxica en sus hojas. La información para poder elaborar esa toxina provenía del gen bacteriano.

La transferencia de información genética entre especies, una de ellas un vegetal y la otra una bacteria, se había logrado de una manera racional y dirigida. A partir de ese momento, el concepto de agrobiotecnología se amplió rápidamente, en virtud de que muchas tecnologías biológicas ya existentes adquirieron nueva dimensión y varias otras han tenido que desarrollarse para poder descubrir los mecanismos de la maquinaria biológica presente en los vegetales.

Debe señalarse que muchos métodos y técnicas surgieron, primero, en la aplicación de la biotecnología a los problemas de salud y, posteriormente, se han utilizado en plantas y animales.

En el marco anterior, el punto de inflexión entre la agrobiotecnología tradicional y la moderna se dio en 1973. La primera sustentada, principalmente, en la experiencia acumulada y en la búsqueda continua de capacidades desconocidas pero presentes en la naturaleza, en tanto que la segunda se fundamentaba en el conocimiento e investigación científica. Esta dualidad generó confusiones y problemas, sobre todo al intentar evaluar el potencial de la agrobiotecnología, ya que no es sencillo establecer una clara separación entre ellas, menos aún con los constantes avances que amplían el campo de la investigación y dificultan su delimitación.

Para los fines de este estudio, el término agrobiotecnología, con el propósito de enfocar con mayor precisión el análisis y la discusión, abarca todas aquellas tecnologías basadas en la biología celular y molecular modernas, dirigidas a la producción vegetal, animal y agroindustrial, tanto en el campo de la investigación científica y del desarrollo tecnológico como de la producción y comercialización.

Actualmente, la agrobiotecnología no sólo se refiere a los microorganismos (bacterias, levaduras, algas, hongos), sino que incluye también a las células vegetales y animales. El conocimiento y capacidad al manipular cada ser vivo difiere en términos racionales; y ello complica aún más el análisis global del estado del arte tecnológico en esta área.

En el Cuadro 2 se presentan los principales avances que ha tenido la agrobiotecnología en la década de 1980-1989 (Brumby 1989). Se puede observar que, durante ese período, hubo numerosos descubrimientos científicos y sólo unos cuantos productos (seres vivos nuevos) empiezan hoy a acceder al mercado.

La agrobiotecnología integra un amplio espectro de técnicas, entre las que se mezclan las de frontera y las tradicionales. Por su importancia, destacan en el sector agropecuario la ingeniería genética y el cultivo de tejidos.

En la Fig. 1 se ilustran esquemáticamente los principios de la tecnología más importante y representativa de la agrobiotecnología: ingeniería genética aplicada a plantas. Utilizando este tipo de técnicas ya se han obtenido plantas resistentes a herbicidas y a insectos; y se espera poder lograr variedades con mejores propiedades alimentarias (v. gr. aumento en el contenido de proteínas).

Cuadro 2. Principales avances en agrobiotecnología moderna (1980-1988)*.

Año	Acontecimiento
1980	La Suprema Corte de Estados Unidos de América acepta patentar los microorganismos bajo la ley existente. Se otorga la patente Cohen/Bayer que cubre las técnicas para la tecnología de ADN-recombinante.
1982	a) Primera vacuna animal obtenida por tecnología recombinante es aprobada para venta comercial (colibacilosis). b) Primer producto recombinante farmacéutico aprobado para el uso humano (insulina). c) Primera transferencia exitosa de un gen animal de una especie a otra (ratón transgénico que lleva el gen de la hormona de crecimiento de la rata). d) Primera transformación y regeneración de plantas (zanahoria, por medio de <i>Agrobacterium rhizogenes</i>).
1983	Primera transferencia de un gen vegetal de una especie a otra.
1985	La Oficina de Patentes de EE.UU. extiende patentes a plantas transformadas por ingeniería genética.
1986	a) Cerdos transgénicos con gen de la hormona de crecimiento humana. b) Primer ensayo de campo en EE.UU. con plantas transgénicas (tomates con gen de <i>Bacillus thuringiensis</i> que los hace resistentes a insectos).
1987	a) La Oficina de Patentes de EE.UU. extiende patentes a animales transformados por ingeniería genética. b) Primer ensayo de campo con microorganismos transformados genéticamente.
1988	Primer microorganismo modificado genéticamente que se aprueba para la venta comercial como agente de biocontrol contra una enfermedad vegetal (en árboles frutales).

* Otros productos tales como la hormona del crecimiento para bovinos, vacunas animales (rabia) y juegos o «kits» de diagnóstico para detectar enfermedades en animales y plantas, se han desarrollado en este período, aun cuando su introducción en el mercado no ha sido definitiva por diversos cuestionamientos económicos, sociales y por aspectos de bioseguridad.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

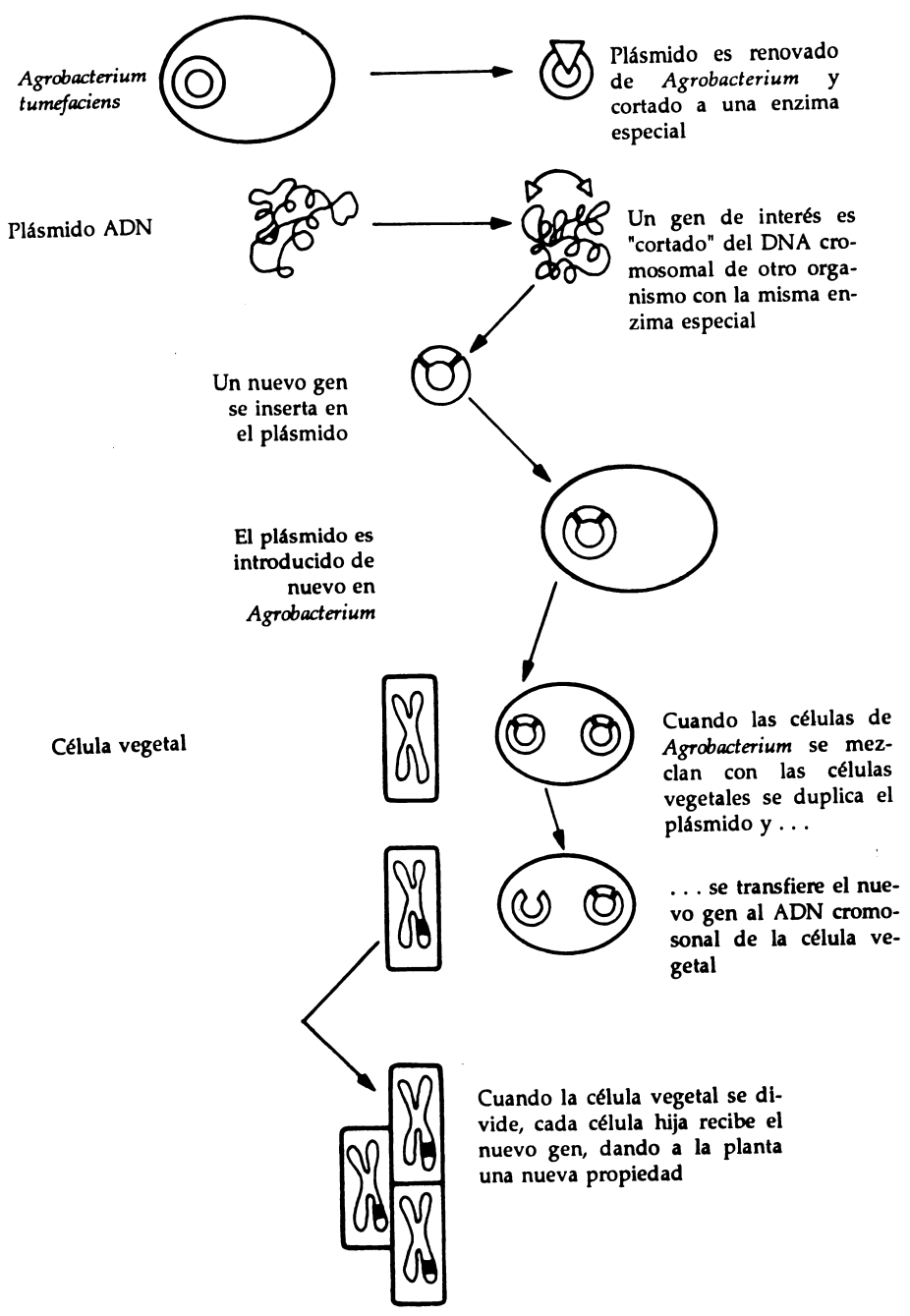


Fig. 1. Ingeniería genética en plantas.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

Cuadro 3. Principales aplicaciones de la biotecnología en diversos sectores industriales (1989).

Sector	Subsector	Productos principales
Agrícola	Reproducción vegetal	Regeneración de plantas; plantas transgénicas; semillas mejoradas.
	Fertilización	Reducción en el uso de fertilizantes nitrogenados y de fósforo; nuevos agroquímicos.
	Control de plagas y enfermedades	Plantas resistentes a plagas y plaguicidas, otros; nuevos biocidas (insecticidas, fungicidas y otros).
	Producción de metabolitos	Metabolitos secundarios vegetales farmacéuticos, saborizantes, fragancias.
Pecuario	Reproducción animal	Transferencia de embriones; selección de sexo; animales transgénicos.
	Salud animal	Control de enfermedades; sistema de diagnóstico vacunas, agentes virales.
	Alimentación animal	Promotores del crecimiento; esquilmos y residuos agrícolas enriquecidos.
Salud	Medicina terapéutica	Cincuenta a ochenta nuevos principios activos, que son proteínas del sistema inmunológico humano.
	Medicina preventiva	Treinta vacunas, cien a doscientos sistemas de diagnóstico basados en sondas de ADN y anticuerpos monoclonales, terapéutica génica.
Alimentos	Proteínas	Nuevas fuentes de proteína para consumo humano; nuevos sistemas de producción de aminoácidos.
	Edulcorantes	Nuevos edulcorantes no calóricos.
	Aditivos	Proteína y derivados sustitutos de grasas, biopolímeros; nuevos sabores y fragancias.
	Transformación	Uso generalizado de enzimas para modificación de alimentos, dándoles nuevas características organolépticas.

Fuente: Quintero 1989.

Cuadro 4. Impacto de la biotecnología en mercados específicos (1989).

Productos	Mercado mundial millones de US\$		Impacto de la biotecnología (%)*
	1995	2000	
Productos farmacéuticos:			
Anticancerígenos	9 500	15 500	30-40
Antiinfecciosos	22 000	30 750	30
Cardiovasculares	45 000	70 600	40
Sistema nervioso central	16 900	23 100	40
Productos químicos:			
Aminoácidos	750	900	50+
Enzimas industriales	500	700	30
Productos agrícolas:			
Insecticidas/ herbicidas	21 200	31 000	50
Plantas y semillas	19 000	26 750	75
Fertilizantes	34 000	45 000	20

Notas:

* Porcentaje de nuevos productos que serán introducidos entre 1986 y 2000, en los cuales estará involucrada la biotecnología.

Fuente: Hayenga 1988.

El nivel actual de desarrollo de estas técnicas se encuentra aún en su etapa embrionaria; no obstante, el potencial de desarrollo que se vislumbra tiende a generar nuevas opciones para un gran número de problemas actuales —algunos de los cuales carecen de solución con las técnicas tradicionales—, así como importantes oportunidades en la industria. Este estudio de desarrollo de la agrobiotecnología la caracteriza como una actividad potencial de largo plazo.

En el corto plazo, sin embargo, los avances logrados en las diferentes tecnologías que integran la agrobiotecnología se han traducido en una aplicación y diversificación de las aplicaciones tradicionales, generando nuevas opciones para la industria actual en términos de nuevos procesos y productos específicos.

El carácter multidisciplinario y multisectorial de su aplicación dificulta la estimación sobre el alcance que tendrá la biotecnología moderna en las diversas áreas productivas en los próximos años.

Por ejemplo, para el año 2000, se estima que en el plano internacional los sectores que habrán sentido mayormente su influencia, tanto en productos como en procesos, son: la agricultura, la ganadería, la salud y los alimentos. De estos cuatro sectores, es en el campo de la salud humana donde se pueden hacer proyecciones más precisas, puesto que sus resultados ya han ido llegando al consumidor.

En los otros tres sectores, todavía existe dificultad para evaluar su impacto, pero no hay duda acerca de su importancia y relevancia futuras. En los cuadros 3 y 4 se han resumido diversas estimaciones recientes sobre la aplicación y mercado de la biotecnología hacia finales de siglo. El mercado de los productos farmacéuticos será superior al de los agrícolas, pero el impacto de la biotecnología en el número de productos nuevos será mayor en la agricultura que en cualquier otro sector (Sasson 1988; Quintero 1990; Smithson 1988).

METODOLOGIA DE LA PROSPECTIVA

Se inicia este capítulo con una definición acerca de lo que es y no es la prospectiva y, para ello, se han tomado como base los trabajos de Alonso (1986), quien ha venido desarrollando y aplicando la prospectiva en diversas áreas del conocimiento humano.

Dice «prospectar es mirar hacia adelante; es imaginar razonadamente lo que podría ocurrir en el futuro, anticipar posibles riesgos y oportunidades».

Prospectiva es también un término cuyo significado se ha prestado a interpretaciones incorrectas, y a confusión. Prospectar no es ni adivinar ni profetizar ni pronosticar. No se trata de predecir, de señalar cómo será en el futuro el objeto de estudio, sino de construir imágenes de cómo podría ser dicho futuro. Y el futuro más interesante es aquí el de largo plazo, aquél que podría permitir cambios radicales, aquél que no necesariamente es una mera prolongación del pasado —aunque ésta no se excluye como una de las imágenes posibles.

Prospectar es pues un ejercicio de exploración —y habrá quien diga que también de colonización— de futuros. Futuros, en plural, aunque se trate de un solo objeto de estudio; porque, si bien el futuro será función de lo pasado, también lo será de lo que ocurra de ahora en adelante y esto no está predeterminado.

La historia se refiere a los mundos de los recuerdos y la prospectiva a los de las posibilidades. La historia nos vincula con la memoria; la prospectiva nos ejercita en la imaginación y la creatividad. Historia y prospectiva son campos que, independientemente de su valor intrínseco, nos permiten entender mejor el presente.

Las imágenes de la prospectiva son un posible insumo del planeamiento, pero no constituyen el planeamiento. Este busca definir modos de acción para que lo deseado y la realidad percibida sean tan parecidos como se pueda en el futuro. La prospectiva se contenta con evaluar modos de evolución posibles, probables o deseables de lo estudiado. Las futuras acciones definidas por quienes planean pueden ser insumo para quienes hacen prospectiva.

La prospectiva es el arte de lo condicional: si «x» ocurre en la fecha «y», entonces el objeto de estudio puede evolucionar como «z», «q» o «w». Es un conjunto de técnicas tomadas en préstamo de otras disciplinas, que permiten definir y establecer opciones evolutivas. No es ciencia, es modo de pensar.

El futuro ha interesado al hombre al menos desde que sus actividades dejaron de ser únicamente las de subsistencia inmediata. Le interesan por supuesto los problemas futuros de su entorno social (familiar, grupal, gremial, nacional), en tanto que, por una parte, le afectarán directamente y a sus descendientes; por otra, si el hombre es altruista, le interesarán porque el futuro social es el de la especie humana.

La prospectiva tiende a tener mayor demanda cuando el hombre percibe que el futuro podría no ser igual que el pasado; cuando la acumulación de hechos puede tener mayor impacto que la mera suma de los impactos individuales; cuando la velocidad de los cambios crece; cuando los eventos exógenos, sobre los que su influencia es limitada, pueden traerle consecuencias negativas; cuando sus acciones para mejorar en un sentido pueden reflejarse posteriormente como un deterioro en otros.

A mayor incertidumbre, complejidad y sensibilidad del sistema ante posibles estímulos, y a mayor turbulencia dentro y fuera de él, mayor parece el interés por anticipar el futuro. La ciencia y la tecnología son, en gran medida, esfuerzos por predecir el resultado del siguiente experimento —en términos determinísticos o probabilísticos—; la primera en busca de la verdad y la segunda, de la utilidad. En general los objetos del estudio de la ciencia y de la tecnología son entes físicos. En ello —y en mucho más— difieren de la prospectiva que, ocupándose de un ente que sólo existe en la imaginación, no es susceptible de un experimento empírico. Y quizás en esto radican las grandes dificultades que se asocian con el estudio de los futuros.

Dado que no se trata de pronosticar el futuro, el valor de las imágenes que de él se construyen no deben medirse en términos de su apego a la realidad. Los ejercicios de la prospectiva deben juzgarse por el rigor con que se efectúan; aunque quizá más que rigor se debiera decir por su valor «artístico». En todo caso, los ejercicios deberían ser repetidos, en el sentido de derivar los resultados de ciertas hipótesis básicas, información y reglas de inferencia que puedan —y deban— hacerse explícitas.

De lo anterior, cabe deducir que los estudios prospectivos enfrentan dos tipos de problemas principales: uno es entender y «dimensionar» la realidad y los posibles futuros; el otro, seleccionar y utilizar algunos instrumentos para generar los posibles futuros.

La literatura sobre estos temas es muy amplia, con enfoques diferentes y, en muchos casos, de concepción filosófica distinta. Para ejemplificar esta situación, se ha seleccionado un método de hacer prospectiva que permite entender las diferencias y dificultades al elegir un enfoque específico en esta área. El proceso de búsqueda es una manera de inquirir y una forma de activar un dominio. Como manera de inquirir, en un sentido colectivo, profundiza sobre una problemática y sobre las acciones que pueden emprenderse. Como forma de activar un dominio, trata de concientizar a los involucrados en una problemática sobre la existencia de un dominio común que los interrelacione estrechamente y, por lo tanto, resulta conveniente para todos la constitución de una imagen consensual que oriente las acciones individuales.

El concepto de dominio ha sido propuesto como unidad de análisis, planeación y acción. Son varios los criterios que pueden emplearse para identificar dominios: geográficos, si el problema en cuestión se relaciona con ciudades o estados; funcionales, si los involucrados se hallan unidos por servicios comunes, como salud o educación; o instrumentales, en función de las actividades de industrias particulares.

Proceso de búsqueda como activador de un dominio

Para que los involucrados en una problemática se integren en un dominio, es necesario que tomen conciencia de su identidad de interrelaciones. Esta identidad requiere el reconocimiento de las fronteras del dominio, de las organizaciones que lo conforman, de su homogeneidad y heterogeneidad, entre otros. Los diferentes involucrados deben aprender a acomodar sus intereses parcialmente contradictorios, al mismo tiempo que asegurar una base común de acción. Esta identidad hace posible emprender acciones en una misma dirección.

Hay dos tipos de dominio: los que tienen un núcleo central, en forma de una organización de referencia; y los que tienen un carácter de red. Solamente los primeros son capaces de emprender acciones propositivas en términos de dominio. La organización de referencia debe proveer el liderazgo necesario sin usurpar las funciones de las organizaciones constitutivas.

Proceso de búsqueda como forma de inquirir

El proceso de búsqueda es una forma de inquirir en una problemática. En su diseño se han integrado cinco diferentes tipos:

Tipo Leibnitz

Se basa en la construcción de redes lógicas, donde un nodo corresponde a una aseveración. Las aseveraciones se derivan o deducen unas de otras. Aquéllas que están en la base de la red constituyen los postulados básicos. La verdad de la construcción se basa en la congruencia interna de las aseveraciones y en la veracidad de los postulados. Esta última no puede deducirse de la red, es externa a la construcción lógica.

Tipo Locke

Esta es una forma basada en el consenso. Cuando una comunidad de mentes está de acuerdo sobre una aseveración hay bases para asumir la veracidad. El «método Delfos o Delphi» tradicional es un ejemplo de un tipo de inquirir «lockeano». Cuando un grupo de científicos se reúne para debatir y ponerse de acuerdo sobre líneas de investigación, la forma de inquirir se aproxima a ese tipo.

Tipo Kant

Cuando una mente se confronta con un problema, el punto de partida es su conocimiento *a priori* para conceptualizar la realidad y proponer una solución. Diferentes disciplinas conforman diferentes formas de ver las cosas. En una forma de inquirir tipo Kant, se asume que existen múltiples enfoques para ver una situación. El problema consiste en escoger el mejor.

Tipo Hegel

Si se quiere encontrar los puntos críticos de un modelo o de un plan, no basta examinar la consistencia interna de sus aseveraciones o someterla a un proceso de consenso. Una de las formas más efectivas es confrontar el modelo con su «enemigo mortal»: una antítesis o antiplan. La antítesis es una tesis, bien construida y lógica pero incompatible con la tesis. El carácter antitético sólo puede reconocerse al confrontar la tesis con la antítesis. De la confrontación de ambas se genera la síntesis. Esta es una tesis de nivel más alto que supera las contradicciones que existen entre la tesis y la antítesis.

Tipo Singer-Churchan

Esta forma integra las anteriores. Se basa en el reconocimiento de que cuando no se puede conocer algo con mayor precisión, no significa que lo desconocemos totalmente, sino que nuestros instrumentos de conocimiento no son suficientemente finos. Y, por lo tanto, es necesario cambiarlos por otros más precisos, con el fin de continuar el proceso de inquirir.

Fases de la prospectiva

Las diversas fases requeridas en la realización de un ejercicio de prospectiva y de diseño de futuros (Sachs 1980) se ilustran en la Fig. 2.

En este esquema se aprecia la secuencia en que se deben establecer algunos conceptos y definiciones. Por ejemplo, se debe hacer explícita la visión del futuro deseado o, en forma más general, el sistema de valores que sirven de guía a quien toma las decisiones, y a medida que avanza el estudio prospectivo, determinar los futuros posibles con el fin de presentar opciones de políticas concretas.

La definición y representación explícita del modelo de la realidad en que se basarán las decisiones son fundamentales y requieren identificar el objeto focal y los entendidos ambientales relevantes, así como sus principales propiedades y las relaciones más significativas que se establecen entre ambos. Existe una estrecha relación entre los instrumentos disponibles y la determinación de futuros factibles. De ahí que la metodología utilizada en prospectiva sea básica en cualquier ejercicio.

Metodología

Una de las principales formas en que los estudios prospectivos varían es en términos de la metodología que emplean. Para poder realizar un buen estudio, se debe ser capaz de evaluar la relevancia, conveniencia y limitaciones de una amplia gama de metodologías, incluyendo: proyección lineal, proyección no-lineal, regresión, programación lineal, programación no-lineal, econometría, análisis de entrada-salida (insumo-producto), dinámica de sistemas, escenarios, método Delphi, evaluación de riesgos, contabilidad de procesos, contabilidad de energía, evaluación social, evaluación tecnológica, evaluación de impactos en el medio ambiente y pronóstico tecnológico.

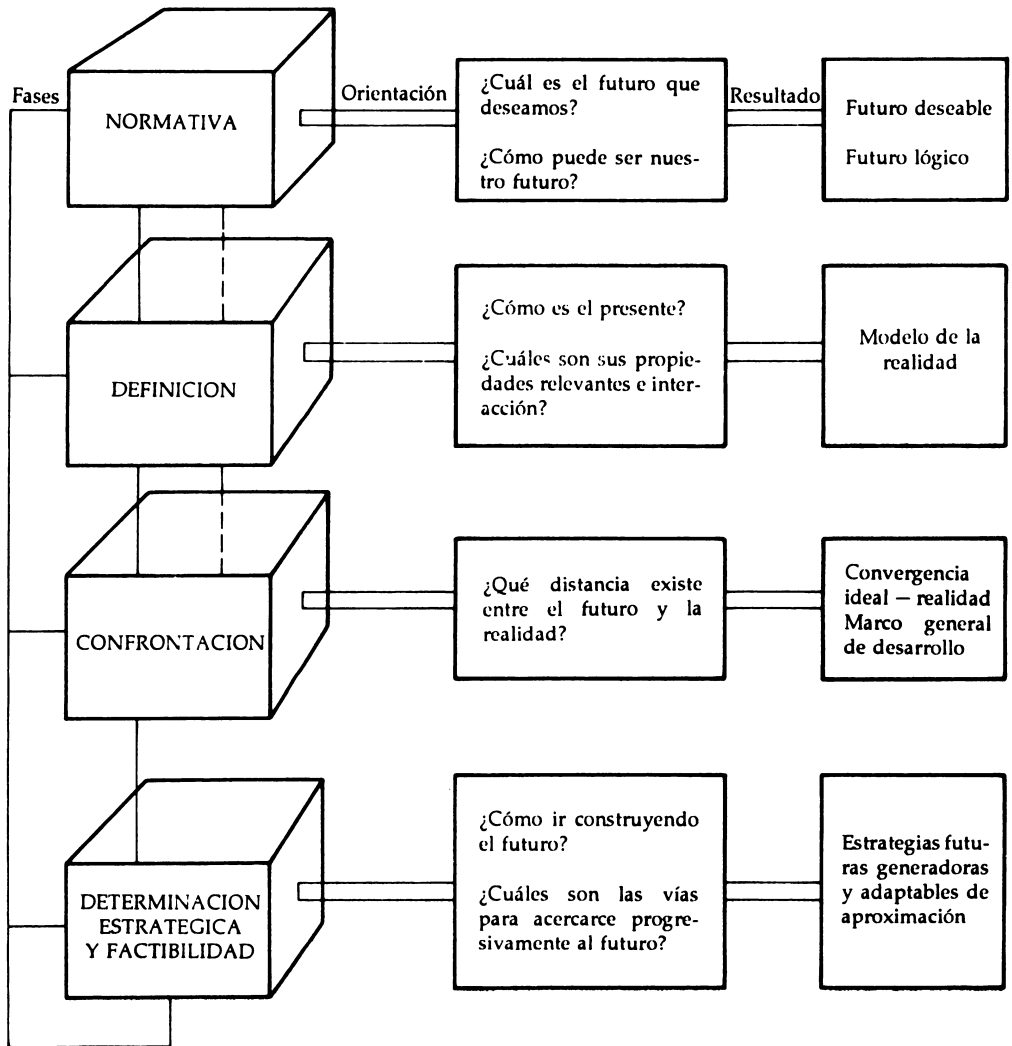


Fig. 2. Metodología prospectiva.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

metodología para hacer prospectiva en la región, deberá ser generada endógenamente y que, salvo condiciones muy particulares, se tendrán que adecuar metodologías utilizadas en los países industrializados. Los estudios sobre prospectiva de la biotecnología han sido metodológicamente muy limitados, como se verá más adelante; pero en casi todos ellos se ha utilizado la consulta a expertos. De ahí que es importante presentar con mayor detalle esta técnica, para así poder evaluar con mayor precisión los resultados y alcance de su utilización.

Método Delphi

La técnica Delfos o método Delphi toma su nombre de las consultas que los antiguos griegos hacían al oráculo de Delfos (Ramírez 1977; Linstone y Turoff 1977). Indica, pues, la acción de acudir al experto para pedir consejo sobre algún asunto, específicamente si éste se refiere al futuro. La consulta se lleva a cabo a través de la aplicación de una serie de cuestionamientos y para cada uno de ellos se ordenan las respuestas, que retroalimentan a los expertos encuestados. Sin embargo, se excluye la confrontación directa de los participantes. El número de cuestionarios oscila entre tres y cinco.

El objetivo principal de esta técnica consiste en un proceso de comunicación de grupo que permite resolver, como un todo, un problema complejo. El propósito de su uso se ha concretado de dos maneras:

- Obtención de datos no disponibles o demasiado costosos (caso de los países en desarrollo, donde falta información socioeconómica); y
- asesoría para la toma de decisiones, por ejemplo en la solución de un problema urbano.

En las aplicaciones generales del método, se ha logrado una experiencia muy amplia, habiéndose usado como herramienta la prospectiva y sistema de comunicación para definir políticas –entendidas éstas como la búsqueda y formación de metas– en los negocios y en las universidades.

Un aspecto muy importante es el empleo de Delfos en la aplicación y medición de los resultados obtenidos. Entre otros aspectos, se ha encontrado que la convergencia de las respuestas de los expertos es más común que la divergencia. La incertidumbre aumenta a medida que el horizonte de predicción está más lejano. La distribución de las respuestas sigue la curva normal.

Hay bastante consistencia en las respuestas con relación al pesimismo u optimismo de quien responde y, con base en esto, se puede hacer una evaluación ajustada de la respuesta. Otros estudios han enfocado la medición de los efectos de la retroalimentación, basándose en el grado de consenso y la velocidad con que ésta se alcanzó.

La puesta en práctica del método Delfos es muy sencilla. Básicamente se realizan los siguientes pasos:

- Elección de los expertos por consultar;
- información general de lo que se pretende (si es necesario, se administra un cuestionario preliminar);
- primer cuestionario o primera vuelta: síntesis y procesamiento de las respuestas con vistas a la retroalimentación (se solicita nueva o complementaria información);
- segundo cuestionario o segunda vuelta: retroalimentación, procesamiento de respuesta, información complementaria;
- tercer cuestionario o tercera vuelta: procesamiento de respuestas;
- cuarto y quinto cuestionarios: opcionales;
- síntesis e informe: tomando en cuenta el objetivo y la naturaleza de la investigación, los resultados podrán indicar el consenso de los consultados o bien el surgimiento de nuevas alternativas o de una nueva síntesis.

Las limitaciones básicas que tiene el método Delfos son:

- Tener que predecir de alguna manera el futuro, a pesar de la falta de conciencia del pasado y de la evolución histórica;
- propensión a simplificar demasiado los problemas; es obvio que se tenderá a obtener visiones simples de cuestiones complicadas. Hay que cuidar que la búsqueda del consenso no llegue a caer en lugares comunes o soluciones fáciles;
- elección de los expertos por consultar. Estos no necesariamente deben ser intelectuales. Si se requiere, hay que consultar a los mismos afectados por el problema que se quiere investigar, así sean analfabetos.

3

NIVEL ACTUAL DE LA AGROBIOTECNOLOGIA: AVANCE CIENTIFICO Y APLICACIONES

Tratar de establecer el grado de avance actual (*state of the art*) de las agrobiotecnologías es una tarea compleja, ya que involucra una diversidad de técnicas aplicadas a una amplia gama de organismos. Se da el caso de que algunas técnicas están más avanzadas o funcionan mejor con ciertas especies, y en otros casos particulares se tiene un conocimiento limitado del sistema biológico que se quiere desarrollar o transformar.

En esta sección del documento se describen las principales agrobiotecnologías y, posteriormente, se presentan sus aplicaciones más relevantes. De esta manera se considera que se puede obtener una visión general del avance de cada una de ellas. Para los interesados en conocer la frontera del conocimiento para una especie dada, se recomienda recurrir a la literatura especializada.

En los apéndices: **A. Avances en biología molecular vegetal**, y **B. Avances en las técnicas de cultivo de tejidos vegetales**, se presentan con mayor detalle estos aspectos técnico-científicos.

Descripción de las principales agrobiotecnologías

Un aspecto fundamental de la nueva biotecnología es su carácter intensivo en lo que respecta al uso del conocimiento científico. En el período anterior a Pasteur, la biotecnología se limitaba a la aplicación de una experiencia práctica que se transmitía de generación en generación. Con Pasteur, el conocimiento científico de las características de los microorganismos comenzó a orientar su utilización práctica, pero las aplicaciones industriales se mantenían fundamentalmente como artesanales, con la excepción de unas pocas áreas de la industria química y farmacéutica —como la de antibióticos—, en las cuales se

inician las actividades de investigación (I) y desarrollo (D) en el seno de la corporación transnacional.

En todos los casos, la innovación biotecnológica surge en el sector productivo; en cambio, los desarrollos de la nueva biotecnología se originan en los centros de investigación, generalmente localizados en las universidades (Bifani 1988).

Las nuevas biotecnologías pueden agruparse en cuatro categorías básicas:

- Técnicas para el cultivo de células y tejidos;
- procesos biotecnológicos, fundamentalmente de fermentación, que incluyen la técnica de la inmovilización de enzimas;
- técnicas principalmente microbiológicas que se aplican a la selección y cultivo de células y microorganismos; y
- técnicas para la manipulación, modificación y transferencia de materiales genéticos (ingeniería genética).

Aun cuando los cuatro grupos se complementan entre sí, existe una diferencia fundamental entre los tres primeros y el cuarto. Los primeros se basan en el conocimiento de las características naturales, el comportamiento de los microorganismos y el uso deliberado de estas características (de cada organismo en particular) para el logro de objetivos específicos en nuevos productos o procesos. La enorme potencialidad del último grupo se deriva de la capacidad de manipular las características estructurales y funcionales de los organismos, y de la aplicación práctica de esta capacidad, para superar ciertos límites naturales en el desarrollo de nuevos productos o procesos.

En el Cuadro 5 se presentan los diversos tipos de ingeniería genética en sus diferentes niveles. Se observa que en todas las técnicas se modifica o combina material genético para aumentar la variedad; sin embargo, los grados de control son muy diferentes. En la cría o cultivo tradicional, al combinar conjuntos genéticos completos de plantas o animales, el proceso es prácticamente aleatorio. En los niveles celular y molecular, en cambio, la especificidad es mucho mayor, la información genética transferida es menor en cantidad y el control llega incluso hasta el nivel del gen individual.

Cuadro 5. Características de los diferentes tipos de ingeniería genética.

Tipos	Organismo completo	Ingeniería genética celular	Ingeniería genética molecular
Nivel	Organismo	Célula	Molécula
	Cruza y selección (procesos sexuales) Inseminación Transplante de embriones	Fusión celular Cultivo celular (procesos no sexuales)	Recombinación del ADN
Grado de control de la variación genética	Aleatoria	Semialeatoria	Dirigida
Conocimiento de la variación	Desconocida (impredecible)	Poco conocida	Conocida
Variación secundaria	Desconocida	Desconocida	Conocida
Ensayos requeridos	Muchos	Número intermedio	Pocos
Restricción según especies	Principalmente dentro de una especie	Dentro y entre especies	Dentro y entre especies
Características tecnológicas	Intensivo en trabajo; lento	Moderadamente intensiva en uso de mano de obra. Uso de calificaciones profesionales	Intensiva en investigación y conocimientos

Fuente: Hardy y Glass 1985.

En el Cuadro 5 se expresan también las consecuencias que tiene esa primera característica diferencial —especificidad y control— en lo referente a la orientación y conocimientos posibles del cambio genético en cada nivel biotecnológico. Faltaría solamente agregar que las nuevas técnicas —en la medida que son efectivamente dominadas— permiten un control mayor y comprensión de los tiempos para lograr los cambios con respecto a los plazos tradicionales de la evolución o de la cruce tradicional.

En ello, tiene que ver el grado de control logrado y el menor número de experimentos necesarios para generar variantes.

Desde un punto de vista técnico diferente, es posible agrupar las principales tecnologías que forman parte de la agrobiotecnología así:

- Ingeniería genética.
- Anticuerpos monoclonales.
- Cultivo de tejidos y fusión celular.
- Biosíntesis de metabolitos secundarios.

A continuación se describe cada una de ellas:

Ingeniería genética

La ingeniería genética representa, sin duda, la tecnología más importante y representativa de los desarrollos biológicos presentes y futuros (Office of Technology Assessment of the US Congress 1984; Quintero 1991; Soifer 1987). En esencia, constituye la programación de seres vivos mediante la manipulación genética.

La ingeniería genética, conocida también como tecnología del ADN recombinante (RADN), consiste en el manejo de la información contenida en el ADN, por medio de cortes e inserciones de pequeñas partes de material genético, proveniente de otros seres vivos o de tipo sintético en los que previamente se ha programado una nueva función. En la Fig. 4 se ilustra la aplicación de esta técnica en plantas.

El paso de máximo interés consiste en llevar partes del ADN de un organismo al ADN del otro, de tal manera que cuando el receptor duplique su ADN en el curso de su multiplicación también duplique el ADN transferido, ampliando su código de instrucciones de producción de proteínas con las correspondientes al gen transferido. Se llama **clonación** al proceso de aislar un segmento de ADN de su medio inicial y de ampliarlo selectivamente en la forma indicada, aumentando la variedad genética del organismo receptor e incorporándole capacidades productivas adicionales a las propias.

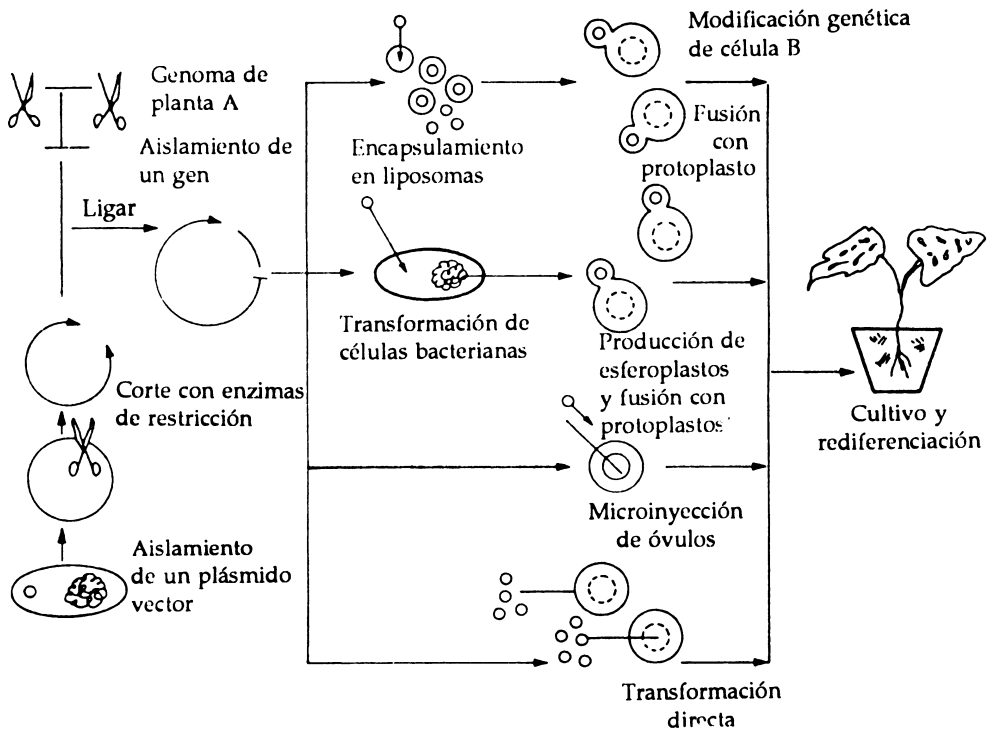


Fig. 4. Introducción *in vitro* del ADN a la célula receptora.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

Las técnicas señaladas, por otra parte, no dependen sólo de la transferencia de genes; es posible también sintetizar químicamente un gen inédito con capacidades predeterminadas de dirección de síntesis molecular e incorporarlo al ADN receptor, con los mismos efectos que en la recombinación con genes naturales.

La «expresión» es un suceso normal en la naturaleza: es la forma de hacer un operativo caso a caso (proteína a proteína) del repertorio global de instrucciones del ADN completo. Pero ese paso no es fácil. La expresión del gen transferido en su nuevo medio —el ADN recombinado en el organismo receptor— es un proceso no automático ni de éxito garantizado, pero sin el cual la aplicación de la recombinación no alcanza resultados operativos.

Por ejemplo, aun cuando el código genético sea prácticamente universal, las señales regulatorias que afectan la operación de los genes varían entre especies, de modo que la "expresión" del gen transferido requiere la manipulación del

ADN para incorporarle los controles o secuencias regulatorias del organismo receptor.

Se requiere igualmente encontrar los medios de transporte o "vectores" adecuados entre los diferentes posibles, que sean aceptados por el receptor, que sean autónomamente reproducibles y que copien fielmente el segmento de ADN del organismo donante.

También se requiere un sistema de selección de células que hayan recibido ADN y la definición de ensayos que permitan verificar cual secuencia particular de ADN ha recibido la célula. Desde el punto de vista práctico, puede convenir lograr que el organismo receptor transfiera al medio exterior el producto proteínico, en lugar de producirlo y retenerlo en el interior de las células, para facilitar la extracción y purificación. Son, por lo tanto, numerosas las variables que se deben controlar y las soluciones que se deben crear para establecer el control, confiabilidad, estabilidad y productividad de las transferencias genéticas; y, en particular, para el logro de resultados tecnológicos y económicos estables y eficientes.

El nivel actual de esta tecnología se expresa en el establecimiento de unidades funcionales unitarias, básicamente proteínas, y, con ellas, se busca desarrollar procesos que las integren en vías biosintéticas. El propósito es generar nuevos productos tales como antibióticos, aminoácidos, enzimas y una diversidad de propiedades adicionales que modifiquen radicalmente la estructura biológica y su posterior aplicación.

En virtud de su reciente desarrollo, sus efectos en la sociedad y en el aparato productivo, en general, el nivel actual de la agrobiotecnología —aunque incipiente— abre inmensas perspectivas de cara al futuro; las cuales se sintetizan en su capacidad de programación de los seres vivos, aumentando sus cualidades naturales, alterándolas o desarrollando otras nuevas, al tiempo que reducen y eliminan sus vulnerabilidades intrínsecas o de adaptación a un medio ambiente específico.

Con respecto a su potencial en el sector agropecuario, las expectativas generadas por la ingeniería genética se asocian con los grandes problemas de la alimentación en el mundo. En el área pecuaria, el mejoramiento de razas, la selección de sexos, la viabilidad de nuevas fuentes de alimentación y la nueva terapéutica constituyen los principales factores del cambio.

Su mayor potencial, sin embargo, se perfila en la agricultura, tanto en la dimensión del cambio como en los impactos económicos que conlleva. Aquí, la ampliación de la producción agrícola constituye el objetivo estratégico por

la vía del mejoramiento, adaptación y selección de especies actuales y nuevas de mayor productividad y rendimiento, capaces de crecer en suelos hasta ahora considerados no aptos para la agricultura. Hoy en día existen cinco mil especies vegetales con potencial para alimentación humana, y sólo se aprovecha treinta de ellas. Si se explotara este potencial, se revolucionaría la agricultura actual y sus relaciones con la industria.

En la Fig. 5 se muestra el amplio espectro y uso de las tecnologías de ADN recombinante. Como se puede apreciar, su aplicación abarca una gran variedad de sectores productivos y, prácticamente, no tiene límites en cuanto al ser vivo por utilizar. También debe destacarse que su uso abarca tanto los productos tradicionales como los más novedosos.

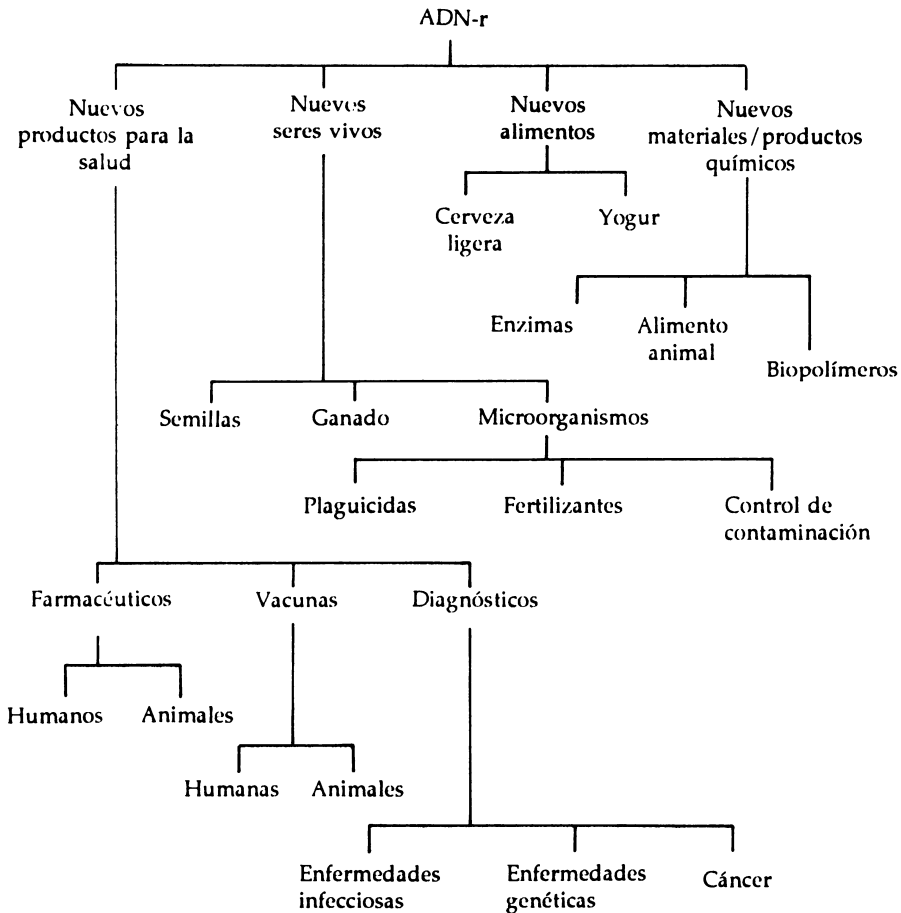


Fig. 5. Tecnología de ADN recombinante: Su espectro y uso.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

Resulta evidente que su mayor uso se da en el campo de la salud, aunque cabe señalar que el área de diagnóstico cubre prácticamente todos los sectores industriales.

El método convencional de producción de anticuerpos utiliza la respuesta inmune de un animal inoculado con el antígeno. Pero el método no es satisfactorio por la limitación cuantitativa de la producción al no inyectarse antígeno puro, lo que genera otros anticuerpos no buscados; y la propia heterogeneidad del conjunto de anticuerpos creados frente al antígeno, por ejemplo, cuando se utilizan caballos para producir anticuerpos para uso humano.

La solución está en la creación de hibridomas por fusión celular. El cultivo de los hibridomas produce cantidades prácticamente ilimitadas de anticuerpos idénticos –monoclonales– en alto grado de pureza y en forma concentrada. Esto permite contar con anticuerpos capaces de combatir los principales virus, bacterias, hongos y parásitos infecciosos y de diagnosticar la presencia de los mismos en los fluidos corporales.

Cultivo de tejidos y fusión celular

El cultivo de tejidos constituye la alternativa del hombre frente a la naturaleza en el proceso de selección de especies animales y vegetales (Soifer 1987; Robert y Loyola 1985). A diferencia de la operatividad de orden natural, el hombre ha centrado su atención en el interior de las especies mismas, privilegiando –a través de una rigurosa selección– el desarrollo de los seres que tengan mayor potencial para atender sus necesidades básicas y mayor capacidad de adaptación a su medio ambiente.

Este propósito ha estado siempre presente a lo largo de toda su historia. Primero, en la búsqueda de mejores medios para multiplicar sus cultivos esenciales y, después, en la selección y desarrollo de nuevas variedades que se adecúen con mayor eficacia a sus propias necesidades. Este proceso, sin embargo, parece haber llegado a su límite con las técnicas clásicas de programación de especies, básicamente por su lentitud y alto costo asociado. El desarrollo de una nueva variedad con los medios tradicionales, desde su selección hasta su cultivo comercial, insume entre 10 y 15 años.

Con la reciente aparición de la tecnología de cultivo de tejidos, es posible trascender estas limitaciones, puesto que dicha tecnología permite reproducir seres vivos –animales o vegetales– en forma eficiente, acelerada y en gran escala, fuera de su medio natural, a partir de sus órganos o de partes de ellos.

El grupo de técnicas de nivel celular denominado genéricamente «cultivo de tejidos» —en rigor comprende varios niveles y tipos de células, tejidos y órganos— guarda analogía con la fermentación de microorganismos, pero difiere en que se realiza con células de plantas y animales. Se puede utilizar en procedimientos de regeneración de individuos completos, o bien para producir algunos metabolitos específicos (v. gr. para obtención de productos químicos directamente de células vegetales sin el cultivo del individuo completo), y en la bioconversión o biotransformación de una sustancia en otra en cultivos celulares.

A su vez, las técnicas genéticas de recombinación de ADN y otras, como la fusión de protoplastos celulares, pueden interpretarse como complementarias del ciclo de propagación por cultivo de tejidos, constituyendo dentro del mismo una fase de mejoramiento intermedia entre el establecimiento del cultivo y la posterior generación y propagación de individuos.

Las técnicas de cultivo de tejidos de plantas comprenden el cultivo *in vitro* de meristemas, células somáticas, embriones, anteras, protoplastos y la fusión de éstos, así como las experiencias de cultivo de una amplia variedad de células y tejidos animales. En las plantas, el potencial del método reside en la existencia de células individuales sumamente diversas y con capacidad para generar un individuo completo.

El proceso de cultivo comienza en la colocación de un órgano —llamado «explante»—, o de células de protoplastos, en un medio de cultivo generalmente semisólido. Se observa entonces el desarrollo de un tejido desorganizado y de rápida proliferación, llamado el callo o *callus*. La proliferación ininterrumpida del callo constituye, en sentido estricto, el «cultivo» de tejido.

A partir de ese punto, los manejos del medio son diversos, y, a través suyo, de los cultivos posibles (Fig. 7). Teniendo en cuenta los fines buscados y las técnicas aplicadas, los cultivos de células y tejidos permiten la multiplicación rápida con la producción prácticamente industrial de un alto número de individuos uniformes y libres de enfermedades, y diversas formas de variación genética.

La multiplicación rápida deriva tanto de la regeneración directa (ciclo individuo-tejido-cultivo-nuevos individuos) como de la embriogénesis somática, es decir, el caso en que el cultivo celular no genere individuos directamente sino embriones que pueden ser utilizados como semillas artificiales.

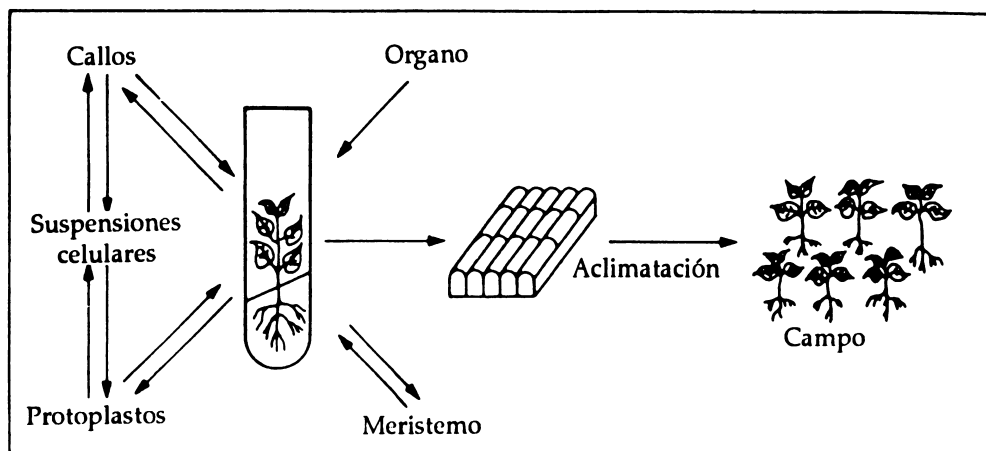


Fig. 7. Micropropagación de vegetales.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

Las posibilidades de variación genética son múltiples. En el cultivo de células somáticas se producen variaciones que pueden ser identificadas y seleccionadas, lo que se llama **variación somaclonal** (Fig. 8). En la embriogénesis somática también puede generarse variación.

En la fusión celular se produce la interacción del material genético de los dos individuos donantes, tras lo cual puede realizarse la proliferación y generación de individuos completos. Finalmente se produce otro tipo de variación, la **variación gametoclinal**, por cultivo de células sexuales como las microesporas.

Estos diversos caminos de proliferación, de variación y de selección se dirigen —en parte empíricamente, ya que es posible que los técnicos no conozcan por qué entre cultivos similares unos resultan en propagación clonal o variación somaclonal y otros en embriogénesis— mediante el control del medio y de las condiciones de cultivo.

Para ello se dispone de diversos medios o variables de control, relativos al explante usado, al medio nutritivo y a las condiciones ambientales del cultivo. En el primer aspecto se trata del tamaño, tipo de tejidos y examen del explante, estado fisiológico de la planta, posición del tejido original en la planta y otros. Con respecto al medio, incluye sales, vitaminas, hormonas y carbohidratos, así como un agente gelificante en el caso de medios semisólidos, y otros elementos como mezclas orgánicas —leche de coco, extracto de malta, de levadura— y aminoácidos, en el caso de medios específicos.

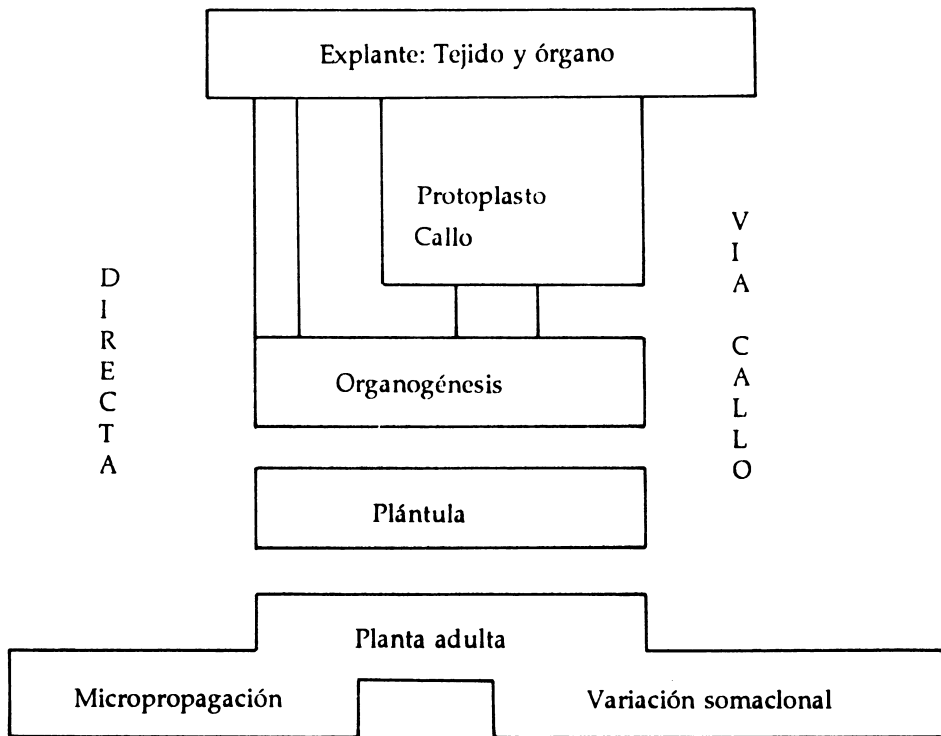


Fig. 8. Regeneración directa y por callo.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

De todos los nombrados, los niveles y las proporciones en que se encuentran presentes las diferentes hormonas, son los que tienen el máximo efecto sobre el crecimiento y la morfología resultantes. Finalmente, en cuanto a las condiciones ambientales, las de manejo habitual son la luz y la temperatura.

El control, a través de las variables citadas, inicia los desarrollos o los dirige hacia un tipo de evolución u otra: lograda una determinada etapa, comienza otra por el cambio de las condiciones —por ejemplo, el callo se genera bajo ciertas condiciones y prolifera después del ajuste de las mismas hacia un nuevo objetivo.

Cuando el objetivo va más allá de lograr variaciones en una especie y se trata de superar barreras naturales, las técnicas que específicamente apuntan a ese fin son las de recombinación de ADN y las de fusión celular. Se las aplica en la fase intermedia de un programa de tres fases, que incluye:

- Establecimiento (con vida) de células de una planta en cultivo.

- Inducción de cambios genéticos y selección de rasgos.
- Restablecimiento de células con las alteraciones genéticas incorporadas y cultivo de plantas.

Existe un paralelo con el manejo de microorganismos pero el proceso no se completa en el nivel celular. Exige superar, además, toda posible barrera de producción y reproducción de individuos completos.

La primera fase se puede iniciar en los diferentes niveles de organización: células, tejidos u órgano, según lo antes explicado. La diferencia y especialización del callo puede servir directamente para crear individuos funcionales completos; el mismo callo puede dar origen a subcultivos, de modo que un gramo de callo llega a producir quinientas plantas. El cultivo de tejido no exige instalaciones costosas; incluso, la simple regeneración de plantas, a partir de células o de partes o de fragmentos, permite la propagación masiva de semillas sin uso, con producción de plantas genéticamente uniformes y libres de los virus que, en muchos casos, reducen notablemente los rendimientos.

La segunda fase implica la manipulación genética de células en cultivo (Fig. 9). Algunas modalidades son las siguientes:

- . Cultivo de células sexuales y embriones;
- . fusión de protoplastos; y
- . transferencia de ADN.

Cabe incluir también:

- . Variación somaclonal, y
- . embriogénesis somática.

El cultivo de células sexuales –huevo y polen– puede aumentar la eficiencia en la creación de líneas de plantas para su cultivo. Con esta técnica, se buscaba mejorar la selección en árboles y crear híbridos de cultivos importantes, así como lograr la supervivencia y germinación *in vitro* de embriones, producto de la cruce de diferentes géneros.

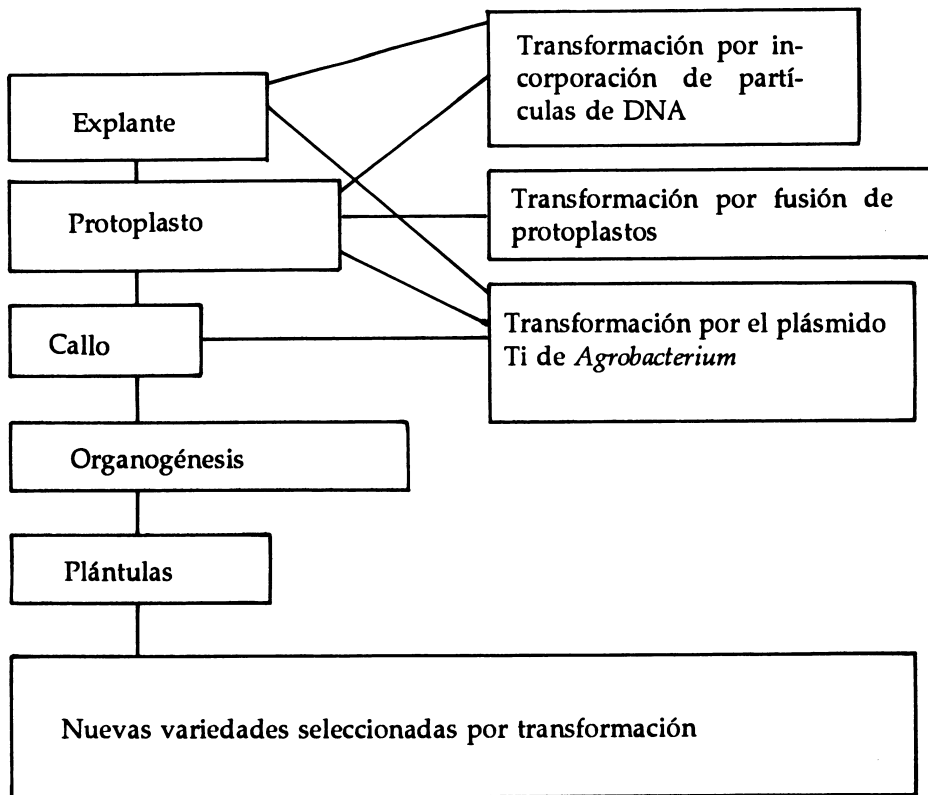


Fig. 9. Métodos de transformación en el cultivo de tejidos.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

En la fusión de protoplastos, bajo las condiciones correctas, éstos pueden formar una célula única, generar una pared celular y proliferar para generar posteriormente plantas, siempre que se logren condiciones estables.

La técnica de transferencia de ADN promete ser eventualmente el más poderoso instrumento de creación de nuevas variedades. Los métodos y resultados, sin embargo, aún no están generalizados. Se buscan intensamente procedimientos y vectores para la transferencia (ver Apéndice A).

La variación somaclonal y la embriogénesis somática comienzan a partir de células corporales no sexuales. Para inducir las mutaciones en proporciones mucho mayores que las espontáneas, se utilizan presiones selectivas —variación de factores ambientales y de la creación de condiciones que pueden ser desfavorables, incluso atacando las células con bacterias y toxinas— y selección de células sobrevivientes.

En todas las técnicas indicadas disminuyen, en distintos grados, el tiempo y número de cruces y experimentos necesarios para lograr resultados dados, con respecto a técnicas convencionales de cruzamiento. Por otra parte, en todos los casos es imprescindible la búsqueda e identificación de los especímenes con resultados favorables.

Cabe también señalar el carácter incipiente y la falta de total dominio sobre las técnicas. De hecho, sólo en 1981 se consideró que la variación somaclonal podría ser una ventaja y no un inconveniente nacido de errores técnicos en la propagación clásica. Todavía hoy, el método carece de predicción y sólo pocas células del callo regeneran plantas completas, lo que puede deberse a la mezcla de células con diferente nivel de desarrollo en el tejido en cultivo.

Las limitaciones sobre la mayor aplicación de estas técnicas incluyen la insuficiencia de conocimientos biológicos y fisiológicos de nivel molecular y celular; la dificultad en lograr la expresión de genes cuando se usa la recombinación genética; las limitaciones en la regeneración de individuos (tercera fase); y, por supuesto, el logro de estabilidad, eficiencia y economía en los procesos.

Biosíntesis de metabolitos secundarios

Las células vegetales cultivadas en medio líquido producen gran cantidad de sustancias químicas como alcaloides, esteroides, fenoles, aminoácidos, pigmentos (Fowler 1984; Curtin 1985), muchos de los cuales tienen gran valor comercial (Recuadro 1, Cuadro 6). El cultivo de células vegetales en reactores biológicos de gran capacidad para la producción industrial de algunos de estos compuestos, es una posibilidad real pero limitada, hasta ahora, por dos factores:

- Lento crecimiento de los cultivos de células vegetales (comparado con el de los microorganismos), lo que disminuye su eficiencia y aumenta sus costos;
- aún escaso conocimiento sobre los mecanismos de regulación de la biosíntesis de compuestos secundarios, lo que dificulta la manipulación genética de las células para la obtención de líneas sobreproductoras de metabolitos específicos.

Recuadro 1. Metabolitos de interés agrícola y alimentario producidos por cultivo de tejidos de plantas

- | | | |
|---------------------------|--------------------------------|---|
| - Aceites | - Derivados del ácido benzoico | - Péptidos |
| - Acidos nucleicos | - Edulcorantes | - Pigmentos |
| - Acidos orgánicos | - Emulsificantes | - Polisacáridos |
| - Agentes antitumorales | - Enzimas | - Proteínas |
| - Agentes antimicrobianos | - Esteroides | - Reguladores del crecimiento (plantas) |
| - Alcaloides | - Especies | - Taninos |
| - Aminoácidos | - Hormonas | - Terpenos |
| - Aromas | - Inhibidores enzimáticos | - Saborizantes |
| - Azúcares | - Insecticidas | - Vitaminas |
| - Carbohidratos | - Lípidos | |
| - Condimentos | - Perfumes | |

Fuente: Fowler 1984.

Estas limitaciones son temporales, ya que el continuo desarrollo de nuevos métodos de cultivo y el avance del conocimiento de la bioquímica de las células vegetales tiende a aumentar la eficiencia y a reducir costos; de tal manera que la explotación industrial del cultivo de células vegetales sería una realidad en un plazo más corto que el predicho (10-15 años).

De hecho, el primer producto comercial de esta tecnología se encuentra ya en el mercado. Cabe señalar que la implementación de líneas de investigación en esta área es más difícil, ya que requiere una íntima colaboración entre biólogos, químicos, ingenieros bioquímicos y químicos orgánicos. El potencial de esta

técnica es muy grande y se espera que tenga importantes efectos en los productos naturales tradicionalmente exportados por los países en vías de desarrollo.

Cuadro 6. Precio y mercado de metabolitos secundarios de plantas

Compuesto	Uso	Precio (US\$/kg)	Estimaciones del valor del mercado (x10 ⁶ US\$)
Menta	Saborizante, fragancia	30	85-90 (mundial)
Quinina	Saborizante en farmacia	100	5-10 (EE.UU.)
Piretrina	Insecticidas	300	20 (EE.UU.)
Codeína	Sedante	650	50 (EE.UU.)
Ajmalicina	Problemas circulatorios	1 500	4.5-7.5 (mundial)
Digitalis	Desórdenes cardiacos	3 000	20-55 (EE.UU.)
Vinblastina/ Vincristina	Leucemia	5 000	18-20 (EE.UU.)
Jazmín	Fragancia	5 000	0.5 (mundial)
Shikonina	Colorante	4 500	0.6 (mundial)
Vainilla	Saborizante	2 500	75 (mundial)

Fuente: Curtin 1985.

Aplicaciones de las agrobiotecnologías

Se presenta una descripción sintética de las aplicaciones de las agrobiotecnologías en las áreas de mayor actividad económica del sector agropecuario (Van Montagu 1989; López-Munguis y Quintero 1988).

Una revisión de las tendencias recientes en la investigación biotecnológica agropecuaria y forestal arroja una primera conclusión sorprendente: las referencias bibliográficas anteriores a 1984 pueden considerarse prácticamente obsoletas, dada la velocidad con que están ocurriendo los descubrimientos y, en particular, su aplicación (Arroyo y Waissbulth 1988). En el Recuadro 2 se presentan las principales áreas de investigación en proceso de desarrollo.

Recuadro 2. Principales áreas de investigación en el sector agropecuario relacionadas con la biotecnología

- Aumento de la biomasa vegetal y la productividad animal
- Propagación clonal de diversas variedades
- Aumento de la velocidad de cambios genéticos
- Resistencia a enfermedades
- Identificación de microorganismos nocivos
- Aumento de la tolerancia a sequía, salinidad y condiciones adversas
- Fijación de nitrógeno
- Inducción de la producción de híbridos
- Preservación de germoplasma y material genético
- Desarrollo de vacunas y otros productos veterinarios
- Determinación del sexo en animales
- Mayor cantidad y calidad de proteínas y otros nutrimentos

Fuente: Arroyo y Waissbulth 1988.

Biotecnología y agricultura

Algunos productos y procesos biotecnológicos han sido utilizados en la agricultura desde hace algún tiempo, pero sus impactos no han sido considerables. Sin embargo, el acelerado avance de las ciencias biológicas,

aplicadas a la agricultura en los últimos años, ha generado enormes posibilidades por los efectos que podrían tener los productos y procesos biotecnológicos, en cuanto al incremento de la productividad agrícola, la apertura de nuevas tierras al cultivo, el mejoramiento de las características nutricionales de los productos agrícolas y la reducción de insumos, entre otros. En términos conservadores, se espera que las ventas mundiales de tales productos y procesos biotecnológicos alcancen entre US\$5 000 y US\$10 000 millones anuales para fines de siglo. A continuación, se identifican los productos y procesos biotecnológicos en desarrollo que tendrán mayor importancia en los subsectores de producción primaria y de agroquímica en los próximos años.

Producción primaria

Semillas mejoradas. La aplicación de técnicas de ingeniería genética en la producción de semillas mejoradas representará uno de los mayores impactos (Cuadro 7). Actualmente es posible, mediante estas técnicas, obtener plantas con nuevas características que dependen de un solo gen; así se han obtenido plantas resistentes a herbicidas, enfermedades, insectos y plagas.

A mediano plazo, será posible obtener plantas resistentes al estrés ambiental, y, a más largo plazo, plantas autosuficientes, es decir, capaces de fijar el nitrógeno del aire, con mayor eficiencia fotosintética. Se espera que las ventas mundiales de semillas mejoradas por técnicas de ingeniería genética alcancen la cifra de US\$4 000 millones a principios de la próxima década.

Sistema de diagnóstico

Se prevé que para el año 2000, los nuevos sistemas de diagnóstico (anticuerpos monoclonales y sondas) desplacen en un 60%-75% a los convencionales. Las razones para tal desplazamiento, entre otras, son: mayor afinidad, especificidad, sensibilidad y rapidez de detección, aunadas al menor costo de estos nuevos sistemas sobre los convencionales.

Algunas de sus aplicaciones más importantes son: detección temprana de enfermedades, resistencia a enfermedades, residuos tóxicos, características valiosas en plantas, otras.

Cuadro 7. Sistemas de transformación y regeneración actualmente disponibles para plantas de interés económico

Planta	Tejido	Disponibilidad
Zanahoria	Discos de raíz	1982
	Suspensiones proembriónicas	1987
Coliflor	Explantes de hipocotiledones	1988
Apio	Explantes de pecíolo	1988
Algodón	Secciones de hipocotiledones	1987
	Cotiledones	1987
Pepino	Hipocotiledones invertidos	1986
Lino	Cotiledones	1989
Alfalfa	Tallo	1988
Maíz	Protoplastos	1988
Colza	Tallo	1988
	Internodos	1987
Alamo	Explantes de hoja	1987
Papa	Protoplasto	1988
	Discos de tubérculo	1988
Centeno	Retoño floral	1987
Tomate	Cotiledones, discos de hoja	Numerosos reportes
Tabaco	Cotiledones, discos de hoja	Numerosos reportes
Trébol	Hipocotiledones	1987
Nogal	Embriones somáticos	1988

Fuente: Brumby 1989.

Nuevos sistemas de producción

El cultivo de tejidos vegetales permite propagar masivamente un gran número de especies vegetales: ornamentales, forestales, frutales, de uso industrial y otras, libres de plagas y enfermedades y a un costo muy bajo. La multiplicación masiva de plantas por medio de cultivo *in vitro* ha tenido un gran impacto comercial en los últimos años, como se puede ver en los siguientes datos: durante el período 1984 a 1986, las casas comerciales dedicadas a esta actividad en EE.UU. y Holanda se incrementaron de 64 a 270 y de 5 a 30, respectivamente.

En el Cuadro 8 se ilustra cómo es posible reducir el tiempo de generación de variedades mejoradas, utilizando agrobiotecnologías. El cultivo de células vegetales para la producción de metabolitos secundarios, por su parte, permite independizar la agricultura de su medio ambiente natural (suelo, clima, otros).

Cuadro 8. Tiempo requerido para el desarrollo de nuevas variedades mediante variación somaclonal.

Especie	Mejoramiento convencional (años)	Variación somaclonal (años)
Tomate	7 – 8	3 – 4
Remolacha azucarera	14 – 15	7 – 8
Caña de azúcar	14	7
Café	15 – 20	7 – 10

Fuente: Centre for Science and Technology for Development 1984.

Estos nuevos sistemas de producción ya están siendo aplicados comercialmente y, en un futuro cercano, se espera que su utilización se extienda a un gran número de metabolitos de alto valor en el mercado: uso terapéutico, obtención de colorantes, aromas, u otros.

Agroquímicos

En el plano internacional existe un gran interés en los insumos agrícolas de origen biotecnológico, ya que pueden complementar y quizás reemplazar a los agroquímicos usados tradicionalmente. Eso permitiría eliminar los efectos

laterales que su uso, muchas veces indiscriminado, ha causado en la salud humana y animal, así como en el medio ambiente.

Fertilizantes

Las biotecnologías para fijación de nitrógeno podrían eliminar, en el contexto mundial, la necesidad de aplicación de US\$20 000 millones anuales de fertilizantes nitrogenados, a mediano y largo plazo. Existen varios enfoques para lograrlo, que van desde el mejoramiento de los procesos de producción de inoculantes hasta la producción por técnicas de ingeniería genética de plantas capaces de fijar por sí mismas el nitrógeno del aire —especialmente cereales.

Promotores del crecimiento

Actualmente se utilizan productos tradicionales de origen biológico como las giberelinas, pero en el largo plazo se utilizarán entidades bioquímicas diseñadas *ad hoc*, que regulen la expresión genética y permitan controlar el crecimiento y desarrollo de plantas en el tiempo deseado, o alterar la composición intrínseca de los productos agrícolas.

Control de pestes y plagas

Aun cuando el *B. thuringiensis* (BT) ha sido utilizado por más de dos décadas, su empleo masivo es más reciente y ha penetrado las esferas de salud pública, entre otras. Algunas de las razones que han influido para incrementar su uso son: su especificidad a ciertas plagas que permite utilizarlo sin riesgos para la salud humana o para especies benéficas; su carácter biodegradable —se han descubierto nuevas cepas de BT que son efectivas en el control de plagas importantes para la salud pública; su efectividad ante plagas que han desarrollado resistencia a muchos insecticidas químicos; su bajo costo y otros. Recientemente se ha podido introducir la información genética que codifica la toxina del BT en otras especies microbianas, lo que ha permitido extender el uso de la toxina a un mayor número de insectos, así como en plantas, con vistas a obtener especies vegetales capaces de producir su propio insecticida.

En la Fig. 10 se ilustra la obtención de plantas resistentes a virus, otra área de investigación donde se esperan resultados que incidan positivamente en la producción agrícola.

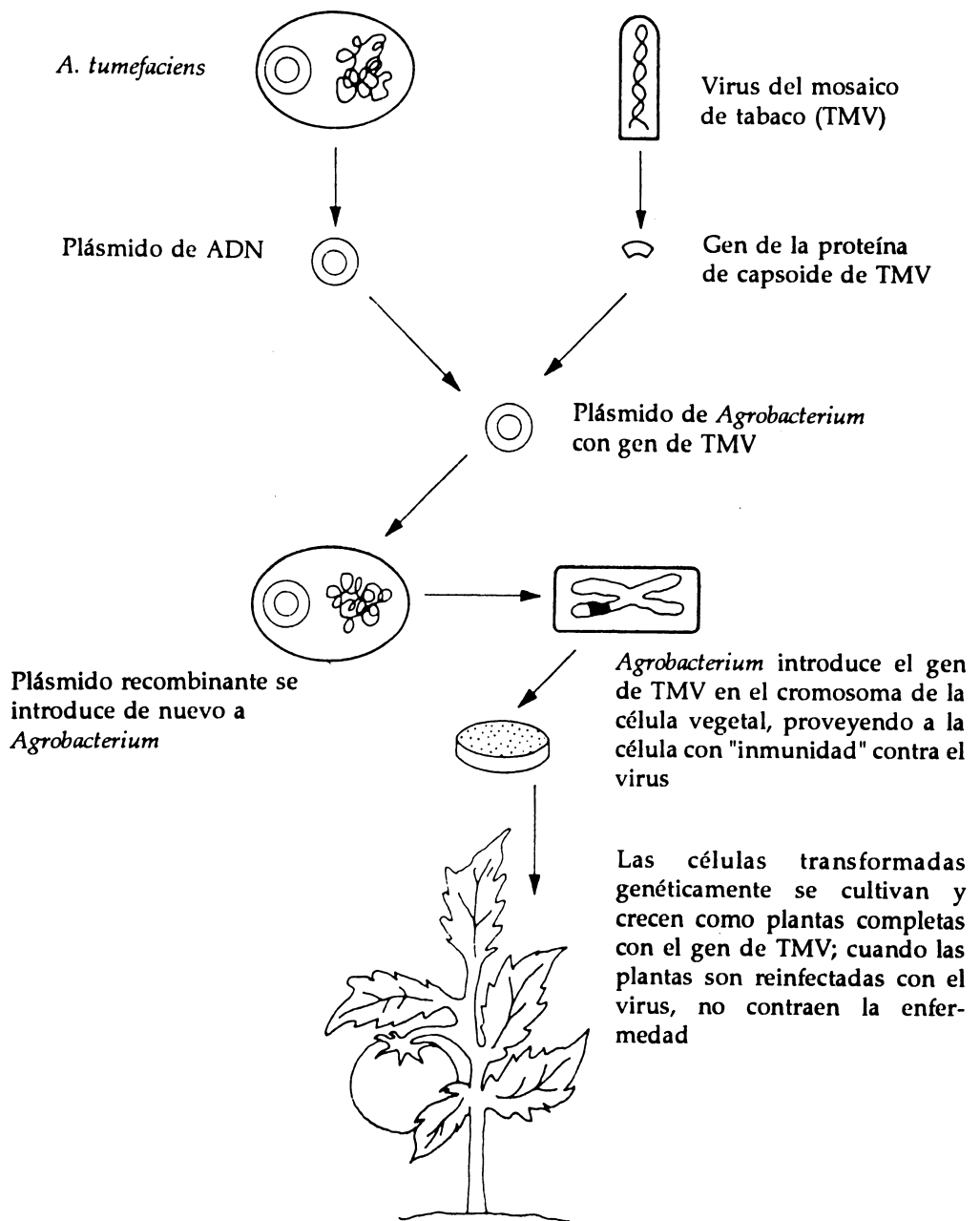


Fig. 10. Obtención de plantas resistentes a virus por ingeniería genética.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

Biotecnología y ganadería

Las aplicaciones de la biotecnología en este sector son muy diversas y abarcan desde la medicina animal hasta la alimentación, pasando por las tecnologías de reproducción y de los animales transgénicos.

Medicina animal

La biotecnología moderna ha hecho posible el desarrollo de un gran número de vacunas y sistemas de diagnóstico de gran importancia en la prevención y cuidado de la salud animal. Estas vacunas son más efectivas y menos costosas que las convencionales. Asociados con las vacunas por ingeniería genética, se han desarrollado sistemas de diagnóstico que permiten diferenciar animales vacunados de animales infectados; algunos de ellos ya se encuentran en el mercado (v. gr. sistemas de diagnóstico para seudorrabia). Estos productos eliminan barreras en la comercialización y transporte de productos de origen animal.

La nueva biotecnología está haciendo posible, además, establecer una nueva medicina terapéutica animal, basada en moléculas biológicas naturales (v. gr. interferón, linfokinas), que disminuirá riesgos para el ser humano en la utilización posterior del ganado en la cadena alimentaria. Lo anterior también se aplica a los promotores del crecimiento, ya que la biotecnología hace posible obtener hormonas naturales del crecimiento por fermentación, que representan menos riesgos que las obtenidas por métodos químicos. Algunos ejemplos son la hormona bovina del crecimiento, que incrementa en un 30% la producción de leche, y la hormona de crecimiento para cerdos, que mejora la eficiencia en la producción de carne magra.

Alimentación animal

Los aminoácidos producidos por métodos biotecnológicos son usados ampliamente como aditivos en la alimentación animal (v. gr. lisina, treonina, triptófano), ya que mejoran la calidad de la proteína aportada por los insumos restantes del alimento balanceado. En los últimos años se han realizado esfuerzos en I y D para optimizar la biosíntesis de aminoácidos (cepas mejoradas, tipos de cultivo, materias primas alternativas), que se han traducido en incrementos importantes en la productividad y en una disminución de los costos.

La proteína unicelular, por su parte, es utilizada en algunos países como ingrediente importante del alimento balanceado (sustituye a las proteínas de

soya y de pescado). Las posibilidades de ampliar su utilización dependen de consideraciones económicas y políticas.

Desde hace algunos años se ha llevado a cabo gran cantidad de I y D en el campo de la proteína unicelular —sustratos más adecuados, diferentes agentes de propagación, ingeniería de procesos, subproductos—, lo que se ha traducido en reducciones importantes en inversiones y costos de producción. Tales desarrollos, especialmente en el caso de las levaduras, han mejorado de manera notable la economía del proceso.

Tecnología de producción

En la última década se han realizado avances importantes en la tecnología de reproducción animal. Una de las técnicas más difundidas es la transferencia de embriones, la cual se usa para incrementar la descendencia de hembras con características valiosas, mediante la utilización de superovulación y transferencia de embriones a madres "sustitutas". Otra técnica útil es la fertilización *in vitro*. Asimismo han ocurrido avances en la separación de espermatozoides por sexos, lo que permite obtener el animal del sexo deseado.

Especies transgénicas

La ingeniería genética en animales —incorporación de genes funcionales extraños en embriones— comenzó a realizarse exitosamente desde principios de 1980. A partir del controvertido experimento del super-ratón —cuando se introdujeron copias múltiples de hormona del crecimiento en el embrión de un ratón—, se ha seguido avanzando considerablemente en la ingeniería transgénica de animales, de tal manera que actualmente es posible, por ejemplo, introducirle a un bovino la información genética que codifique para una proteína humana.

El potencial de esta técnica en la producción de metabolitos secundarios es muy grande. Sin embargo, su difusión masiva dependerá, en gran medida, de cómo se resuelvan los problemas de bioseguridad asociados.

ESTUDIOS PROSPECTIVOS EN AGROBIOTECNOLOGIA

Introducción

Una revisión de la literatura sobre los estudios prospectivos en biotecnología muestra que éstos no han sido abundantes y, aún más, que pocos propiamente pueden considerarse con carácter prospectivo. Si además se intenta identificar los relacionados con la agrobiotecnología, se encuentra que el número es todavía menor.

En el Cuadro 9 se presentan seis características principales que definen cada estudio prospectivo. Para los fines de este trabajo, sólo se han seleccionado aquellos que explícitamente mencionan la agrobiotecnología.

Cuadro 9. Principales características de los estudios prospectivos sobre biotecnología (que incluyen las agrobiotecnologías).

Característica	Opciones
Alcance	<p>A.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nivel mundial (Office of Technology Assessment of the US Congress 1981, 1984; Bull, Holt y Lilly 1982; Hayenga 1988; Persley 1989; Buttell y Cowan 1990; Hardy 1985; Gotsch y Rieder 1989; OECD 1989). • Nivel mundial, incluyendo países en vías de desarrollo (Sasson 1984, 1988, 1989; Mooney 1983). • Nivel regional (RIS 1988; Fowler <i>et al.</i> 1988). • Nivel nacional (Office of Technology Assessment of the US Congress 1986; Shamely y Chow 1989; Quintero 1985; National Research Council 1986; Office of Planning and Evaluation y Center for Food Safety and Applied Nutrition 1988). <p>B.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nivel general, incluye varios sectores de aplicación (Office of Technology Assessment of the US Congress 1981, 1984; Bull, Holt y Lilly 1982; Sasson 1984; Mooney 1983; Buttell y Cowan 1990; Hardy 1985).

Cuadro 9 (Cont.)

Característica	Opciones
	<ul style="list-style-type: none">• Nivel sectorial (Hayenga 1988; Center for Science and Technology for Development 1984; Fowler <i>et al.</i> 1988; Persley 1989; National Research Council 1986; Office of Planning and Evaluation y Center for Food Safety and Applied Nutrition 1988).
Realizadores	<ul style="list-style-type: none">• Experto (Sasson 1984, 1988, 1989; Buttell y Cowan 1990).• Grupo de expertos (Bull, Holt y Lilly 1982; Center for Science and Technology for Development 1984; RIS 1988; Quintero 1985; Hardy 1985).• Grupo consultor (Shamel, Chow 1989; Fowler <i>et al.</i> 1988; Mooney 1983; Office of Economic Cooperation and Development 1989).• Grupo de expertos, incluyendo empresas (Office of Technology Assessment of the US Congress 1981, 1984, 1986; Hayenga 1988; Persley 1989; Gotsch y Rieder 1989; Office of Planning and Evaluation and the Center for Food Safety and Applied Nutrition 1988).
Responsables	<ul style="list-style-type: none">• Agencias internacionales (Bull, Holt y Lilly 1982; Center for Science and Technology for Development 1984; RIS 1988; Persley 1989; Office of Economic Cooperation and Development 1989).• Agencias gubernamentales (Office of Technology Assessment of the US Congress 1981, 1984, 1986; Office of Planning and Evaluation y Center for Food Safety and Applied Nutrition 1988).• Grupos universitarios (Hayenga 1988; Quintero 1985; Buttell y Cowan 1990; National Research Council 1986; Gotsch y Rieder 1989).• Empresas privadas (Shamel y Chow 1989).• Grupos independientes (Fowler <i>et al.</i> 1988; Mooney 1983).• Investigador individual (Sasson 1984, 1988, 1989).
Contenido	<ul style="list-style-type: none">• Descripción técnica de las biotecnologías.• Principales aplicaciones por sector.• Mercados potenciales.• Productos nuevos.

Cuadro 9 (Cont.)

Característica	Opciones
Metodología	<ul style="list-style-type: none">• Evaluación y seguimiento sistemático de publicaciones y fuentes de información relevantes (Sasson 1984, 1988, 1989; Fowler <i>et al.</i> 1988; Mooney 1983; Buttel y Cowan 1990).• Extrapolación de tendencias hacia el futuro, basada en datos históricos (Office of Technology Assessment of the US Congress 1984; Shamel y Chow 1989).• Método Delphi (Hayenga 1988; Hardy 1985; Gotsch y Rieder 1989; Office of Planning and Evaluation y Center for Food Safety and Applied Nutrition 1988).• Opinión de expertos (Office of Technology Assessment of the US Congress 1981, 1984; Bull, Holt y Lilly 1982; Centre for Science and Technology for Development 1984; RIS 1988; Persley 1989; Quintero 1985; National Research Council 1986; Office of Economic Cooperation and Development 1989).• Opinión de no-expertos (RIS 1988).• Descripción de posibles escenarios presentados como alternativas (Office of Technology Assessment of the US Congress 1986; RIS 1988; Gotsch y Rieder 1989).
Resultados	<ul style="list-style-type: none">• Identificación de oportunidades de negocios específicos (Hayenga 1988; Shamel y Chow 1989; Persley 1989; Office of Planning and Evaluation y Center for Food Safety and Applied Nutrition 1988).• Identificación de mercados potenciales futuros (Center for Science and Technology for Development 1984; RIS 1988; Fowler <i>et al.</i> 1988; Mooney 1983; Persley 1989).• Evaluación de impactos socioeconómicos si se aplica la biotecnología (Sasson 1984, 1988, 1989; Office of Technology Assessment of the US Congress 1986; RIS 1988; Fowler <i>et al.</i> 1988; Persley 1989; Buttel y Cowan 1990; Office of Economic Cooperation and Development 1989).• Estimación sobre fechas de disponibilidad de tecnología técnica y comercial (Office of Technology Assessment of the US Congress 1981, 1984; Persley 1989; Hardy 1985; Gotsch y Rieder 1989).

Cuadro 9 (Cont.)

Característica	Opciones
	<ul style="list-style-type: none">• Identificación y selección de áreas de investigación y desarrollo prioritarias (Bull, Holt y Lilly 1982; Shamel y Chow 1989; Quintero 1985; National Research Council 1986).

Fuente: Elaboración del autor.

Alcance

Los documentos referentes al futuro de la biotecnología tienen dos alcances diferentes. Uno se refiere a la región geográfica que abarca, incluyendo estudios de cobertura mundial, regional y nacional. Es digno señalar que un alto porcentaje corresponde a países o regiones industrializadas, mientras que las referencias a países en vías de desarrollo son sólo marginales.

El otro alcance considera las aplicaciones de la biotecnología. Aquí de nuevo el rango varía desde prácticamente todos los sectores productivos hasta algunos análisis para sectores específicos. En la mayoría de los estudios se cubren los aspectos generales, mientras que los dedicados a los específicos son muy limitados en número. Con respecto a las proyecciones en tiempo, éstas varían desde 1990 hasta 2010, pero casi todas indican el año 2000 como el futuro.

Realizadores

Se encontró que los estudios prospectivos son llevados a cabo por expertos, no sólo académicos sino también del sector empresarial. La excepción en este caso la constituyen aquellos grupos de consultores que realizan estudios de mercado y selección de oportunidades de negocio.

Responsables

A partir de los documentos analizados se pudo constatar que diversos grupos han tenido la responsabilidad de organizar y financiar los estudios prospectivos. En muchos casos, agencias gubernamentales e internacionales fueron las responsables directamente; pero, en otros, grupos universitarios, empresas, grupos independientes y hasta investigadores individuales han sido los coordinadores de las actividades.

Contenido

Los elementos que componen un estudio prospectivo varían ampliamente, pero en todos los casos cubren al menos cuatro aspectos:

- Descripción técnica de las biotecnologías;
- principales aplicaciones por sector;
- mercados potenciales para cierta fecha;
- identificación de nuevos productos.

Por supuesto se hace referencia, además, a otros aspectos, como pueden ser los impactos sociales, problemas de bioseguridad, competencia industrial y otros, pero que no se hallan presentes en todos los estudios analizados.

Metodología

Un aspecto interesante y sorprendente, con respecto de las técnicas utilizadas en los estudios prospectivos en biotecnología, es su bajo nivel de sofisticación. Se detectaron sólo seis metodologías diferentes, a saber:

- monitoreo (evaluación y seguimiento sistemático de publicaciones y fuentes de información relevantes);
- extrapolación de tendencias (proyección al futuro de tendencias basadas en datos históricos); método Delphi (consulta organizada y sistemática a expertos);
- opinión de expertos (entrevistas, encuestas para conocer sistemáticamente la opinión de personas con amplio conocimiento del tema);
- opinión de no-expertos (consulta a personas que serán afectadas por el uso y/o aplicación del objeto de estudio); escenarios (descripción de futuros posibles, principalmente estáticos, presentados como conjuntos de escenarios alternativos).

Sin embargo, dos de las metodologías son las más ampliamente empleadas hasta la fecha: monitoreo y opinión de expertos.

Resultados

Dado que los objetivos y análisis de los estudios prospectivos varían caso por caso, es difícil encontrar resultados similares. Pero, a pesar de eso, resulta posible identificar el siguiente patrón: hay una marcada tendencia a seleccionar oportunidades de negocios específicos, a ubicar y "dimensionar" mercados potenciales futuros, y a localizar y escoger áreas de investigación y desarrollo prioritarios. Además, en casi todos los casos, se formula una evaluación de impactos que tendrán su aplicación, principalmente, en aspectos socioeconómicos, estimándose la fecha en que la biotecnología estará disponible técnica y comercialmente. La mayoría de los estudios presentan varios de estos resultados.

Después de este análisis general sobre los estudios prospectivos en biotecnología, se considera importante incluir una breve reseña y comentarios sobre ocho casos específicos, en los cuales se ha enfatizado en el estudio de agrobiotecnologías.

Prospectiva en agrobiotecnología

Estudios de mercado biotecnológico en agricultura (selección de oportunidades de negocio)

Este tipo de estudios generalmente tienen alcance nacional y/o regional —países industrializados— y se refieren a un sector específico industrial. Son realizados por empresas privadas consultoras, cuyo objetivo es preparar un estudio que después será vendido a una multitud de clientes.

Estas empresas cuentan con un grupo técnico no especialista en el tema, encargado de obtener información y procesarla, con asesoría de un pequeño número de expertos. Enfatiza en los mercados, productos, estrategias de inicio de actividades, análisis de la competencia internacional y aspectos regulatorios, basándose principalmente en el monitoreo y en la extrapolación de tendencias. Un resultado típico de este tipo de estudios se presenta en el Cuadro 10, donde se pronostican las ventas de productos biotecnológicos en EE.UU. para 1993 y 1998. En estos estudios no se da demasiada relevancia a la tecnología y se supone que no habrá problemas de disponibilidad; las fechas señaladas como indicadoras no siempre están avaladas claramente.

Cuadro 10. Pronóstico de ventas de productos biotecnológicos en EE.UU. en sectores específicos: 1993-1998 (US\$ 1988).

Sectores	Año Base 1988	Pronóstico 1993-1998
Productos terapéuticos para humanos	500	1 585 - 5 465
Sistemas de diagnóstico para humanos	290	680 - 2 005
Agricultura	35	530 - 2 065
Especialidades químicas	50	175 - 900
Monitoreo de la contaminación	5	75 - 200
TOTAL	880	3 045 - 10 635

Fuente: Shamel y Chow 1989.

Estudios prospectivos sobre biotecnología

En los inicios de la década pasada, aparecieron numerosos estudios que trataban de identificar los sectores productivos en los cuales tendría mayor impacto económico la aplicación de la biotecnología; dichos trabajos pronosticaban las fechas en que ello sería posible. Por ejemplo, la compañía Dupont realizó una consulta a cincuenta expertos en biotecnología, la mitad provino de la industria y la otra mitad de la academia (Quintero 1985).

Se consultó sobre los sectores industriales en los cuales la biotecnología tendría un mayor impacto en el año 2030 para diferentes países y regiones del mundo (Cuadro 11). El grupo de expertos indicó que serían la industria químico-farmacéutica (salud humana) y la agricultura, los sectores dónde se percibiría el mayor impacto mundial. También se les pidió una estimación de la fecha en que los impactos iniciales de la biotecnología se empezarían a sentir (Cuadro 12).

Cuadro 11. Análisis de impactos de la biotecnología en diversas industrias (1989).

Industria	EE.UU.	CEE	Japón	URSS (CEI)	China	Países desarr.
Químico— farmacéutica	4.3	4.2	4.4	3.3	3.2	3.1
Agricultura	3.7	3.6	3.7	3.1	3.1	3.2
Forestal	3.1	2.7	2.2	2.3	2.3	2.5
Alimentos (aditivos)	3.3	3.3	3.6	2.7	3.0	2.7
Química	3.5	3.3	3.7	2.6	2.5	1.9
Energía	2.9	2.9	3.1	2.2	2.3	2.1
Control de la contaminación	3.4	3.3	3.5	1.9	1.9	1.5
Minería	2.6	2.2	1.9	2.3	2.1	2.1
Bioelectrónica	3.3	3.0	3.5	2.4	1.8	1.3

Notas:

Impacto esperado para el año 2030: 5= muy alto; 4= alto; 3= moderado; 2= bajo; 1= muy bajo.

Fuente: Hardy 1985.

Para los países en desarrollo, el pronóstico indica que será hasta mediados de la primera década del siglo XXI cuando la biotecnología tenga impacto en la salud y en la agricultura. Este tipo de análisis ha permitido que gobiernos y empresas orienten sus esfuerzos y recursos hacia el desarrollo de sectores específicos de la biotecnología.

Cuadro 12. Fecha del primer impacto significativo de la biotecnología en diversas industrias.

Industria	EE.UU.	CEE	Japón	URSS (CEI)	China	Países desarr.
Químico-farmacéutica	1990	1990	1990	1998	2002	2005
Agricultura	1996	1996	1998	2002	2005	2008
Forestal	2008	2209	2011	2013	2017	2020
Alimentos (aditivos)	1997	1997	1998	2005	2007	2010
Química	1999	2000	1997	2006	2011	2016
Energía	2019	2010	2008	2014	2016	2020
Control de la contaminación	2002	2002	2002	2015	2018	2023
Minería	2009	2012	2015	2016	2017	2021
Bioelectrónica	2010	2011	2007	2019	2023	2029

Fuente: Hardy 1985.

Estudio prospectivo sobre la agricultura estadounidense

La Oficina de Evaluación Tecnológica (OTA) del Congreso de EE.UU. ha realizado varios estudios sobre biotecnología, su impacto y desarrollo, incluyendo algunos aspectos prospectivos (Office of Technology Assessment of the US Congress 1981, 1984). En 1986, la OTA publicó las estimaciones más confiables sobre el posible impacto de las tecnologías emergentes —incluyendo la agrobiotecnología— en la agricultura de EE.UU. para el año 2000 (Office of Technology Assessment of the US Congress 1986). Se consultó a paneles de científicos norteamericanos (método Delphi, 300 expertos) para que identificaran las nuevas tecnologías emergentes y formularan perfiles de adopción para cada una de ellas. De esa consulta se derivó una estimación del impacto productivo correspondiente.

En el escenario más probable, se espera para la próxima década una gran aplicación en la producción pecuaria (Cuadro 13), debido principalmente al uso de las hormonas de crecimiento que estimularán la producción de leche en vacas lactantes, con un incremento promedio en el rendimiento anual de 12 300 l a 24 700 l de leche por vaca. Para las principales cosechas, se estima que los rendimientos crecerán a una tasa que varía del 0.7% anual (algodón) hasta 1.27% por año (trigo y soya). Si se supone que no habrá desarrollo y uso de estas nuevas tecnologías en plantas y animales, o bien que la nueva tecnología tendrá tasas diferenciales de adopción, entonces se generan diversos escenarios como los mostrados en el Cuadro 14, que indican claramente los beneficios del cambio tecnológico.

Cuadro 13. Posibles impactos de las tecnologías emergentes en la producción agrícola de EE.UU. en el año 2000.

	1982	Proyección Año 2000	Tasa de crecimiento (%)
Ganado bovino			
• Libra de carne por libra de alimento	0.07	0.072	0.2
• Becerros por vaca	0.88	1.000	0.7
Ganado lechero			
• Libra de leche por libra de alimento	0.99	1.93	0.2
• Leche por vaca por año (1000 libras)	12.30	24.70	3.9
Aves			
• Libra de carne por libra de alimento	0.40	0.57	2.0
• Huevos por gallina al año	243.00	275.00	0.7
Cerdos			
• Libra de carne por libra de alimento	0.157	0.176	0.6
• Cerdo por vientre por año	14.40	17.40	1.1

Cuadro 13 (Cont.)

	1982	Proyección Año 2000	Tasa de crecimiento (%)
Cosechas agrícolas			
• Maíz bu/acre	113.00	139.00	1.2
• Algodón lb/acre	487.00	554.00	0.7
• Arroz lb/acre	105.00	124.00	0.9
• Soya bu/acre	30.00	37.00	1.2
• Trigo bu/acre	36.00	45.00	1.3

Fuente: Elaboración del autor 1989.

Cuadro 14. Aumento en la productividad agropecuaria por adopción de nuevas tecnologías (estimación de la producción estadounidense para el año 2000).

Producción agrícola (billones)	1984	Sin nueva tecnología	Nueva tecnología esperada(*) opt.(**)	
Maíz (bu)	7.7	8.6	9.3	9.7
Algodón (lb)	6.2	6.4	6.9	7.2
Arroz (lb)	13.7	15.4	16.3	16.9
Soya (bu)	1.9	3.0	3.2	3.3
Trigo (bu)	2.6	3.3	3.5	3.5
Producción pecuaria (billones de libras)				
Ganado bovino	16.0	12.5	14.1	15.7
Aves	13.5	16.8	16.7	16.7
Cerdos	13.8	10.7	11.7	13.0
Leche	135.4	126.1	192.1	201.8

Notas

(*) Supone que la tecnología se adopta a una tasa esperada.

(**) Supone que la tecnología se adopta a una tasa mayor a la esperada.

Fuente: OTA 1986.

Dos aspectos pueden comentarse sobre este reporte de la OTA:

- Los datos históricos sobre los incrementos anuales de rendimiento en cosechas y producción pecuaria en los últimos treinta años están por encima de las tasas futuras proyectadas por OTA; y
- los grandes aumentos en la producción de leche suponían que había poca dilación en la autorización del uso de la hormona de crecimiento bovino, pero ésta aún se encuentra en fase aprobatoria (la decisión se tomará en junio de 1991).

Este estudio destaca que la agrobiotecnología es un elemento importante del cambio tecnológico en la agricultura estadounidense; pero también señala que son varias las tecnologías emergentes, y que el conjunto es el responsable de los profundos cambios que se darán a fines de siglo (reducción del número de entidades agropecuarias, reducción de la mano de obra empleada en este sector, otros).

Importancia futura de la biotecnología en la agricultura

En este estudio se hace una prognosis de la aplicación e impacto de la agrobiotecnología, pero adoptando el método Delphi para explorar y pronosticar el futuro (Gotsch y Rieder 1989). Los alcances del estudio son de orden mundial y se refieren al sector agrícola exclusivamente. El mismo fue conducido por profesores universitarios y se consultó a expertos (academia y empresas) de Europa y otras regiones del orbe.

Se enviaron dos cuestionarios, de los cuales se obtuvieron respuestas a 69 en la primera etapa y a 62 en la segunda. Las preguntas fueron diseñadas de tal forma que se lograra una respuesta numérica. Inicialmente se exploraron los cultivos más comunes en Europa Central; y los cultivos tropicales sólo fueron investigados cuando se propusieron en el primer cuestionario de los propios expertos.

Se esperan los resultados más importantes para el año 2007: en el maíz (78% de exportación) se aspira a que los atributos dependientes de un solo gen hayan sido resueltos por ingeniería genética; lo mismo para arroz (76%), trigo (67%) y cebada (67%). En las plantas dicotiledóneas también se espera alcanzar logros importantes: papa (85%), colza (82%), soya (78%) y caña de azúcar (78%).

A lo largo del estudio se indica que no debe haber un sobre-optimismo, ya que en muchos casos no existe prácticamente ninguna experiencia sobre la influencia de los nuevos productos genéticos en el metabolismo de las plantas y hay muy poco conocimiento sobre las interacciones entre genes. Una conclusión importante es que la agrobiotecnología reduciría el tiempo para la obtención de nuevas variedades. En el Cuadro 15 se resumen las contribuciones estimadas de la agrobiotecnología para el año 2007, basadas en las respuestas a los cuestionarios.

Cuadro 15. Contribución futura de la biotecnología e ingeniería genética en la producción agrícola en diferentes escenarios.

Escenarios	Más tec.	Como la actual	Menos tec.
Resistencia a enfermedades			
• Métodos <i>in vitro</i> (fitomejoramiento)	1	1	2
• Ingeniería genética	1	2	3
Resistencia a plagas			
• Métodos <i>in vitro</i> (fitomejoramiento)	1	1	2
• Ingeniería genética	1	1	2
Resistencia a virus			
• Métodos <i>in vitro</i> (fitomejoramiento)	1	1	1
• Ingeniería genética	1	1	2
Tolerancia a sequía y frío			
• Métodos <i>in vitro</i> (fitomejoramiento)	1	1	2
• Ingeniería genética	3	3	4
Tolerancia a herbicidas			
• Métodos <i>in vitro</i> (fitomejoramiento)	1	1	1
• Ingeniería genética	1	1	2

Cuadro 15 (Cont.)

Escenarios	Más tec.	Como la actual	Menos tec.
Mejoramiento patrón de aminoácidos			
• Métodos <i>in vitro</i> (fitomejoramiento)	1	1	1
• Ingeniería genética	1	1	2
Mejoría en la capacidad de asimilación de nutrimentos			
• Métodos <i>in vitro</i> (fitomejoramiento)	1	2	2
• Ingeniería genética	2	3	4
Mejora en la capacidad de fijación biológica de nitrógeno			
• Leguminosas	1	2	3
• No leguminosas	3	4	4
Eficiencia fotosintética			
• Métodos <i>in vitro</i> (fitomejoramiento)	1	2	2
• Ingeniería genética	3	4	4

Notas

Cada escenario fue calificado con base en el riesgo, con una escala de 1 a 4, donde:

- 1: Significa que con seguridad se logrará el objetivo.
- 2: Indica que es probable alcanzar el objetivo.
- 3: Denota que es improbable llegar al objetivo en el período propuesto.
- 4: Señala la imposibilidad de lograr el objetivo.

Fuente: Gotsch y Rieder 1989.

Se plantean tres escenarios posibles. El escenario con «más tecnología» significa que habrá un aumento en el gasto de I y D superior al presente, y que el ambiente social, político y legal permitirá una mejor adopción del progreso tecnológico. Por el contrario, el escenario con «menos tecnología» señala que el gasto en I y D disminuye o crece a tasas inferiores a las presentes, y que la adopción de nuevas tecnologías se retarda por una actitud antitecnológica de la sociedad, ya que genera grandes barreras para la introducción de nuevas

tecnologías y seres transgénicos al medio ambiente. El escenario denominado «en la actualidad» representa una extrapolación de la situación vigente, donde el apoyo a la I y D continúa igual, sin incrementarse, y las condiciones de aceptación y uso de nuevas tecnologías tampoco se modifican.

En el estudio, se analizaron nueve áreas de gran importancia para la agricultura, desde resistencia a enfermedades, plagas y virus hasta tolerancia a sequía, frío y herbicidas, así como el mejoramiento de la calidad proteica de los vegetales y eficiencia fotosintética.

En cada una de estas áreas se evaluaron dos posibles métodos técnicos para lograr el objetivo: métodos *in vitro* (fitomejoramiento) y los obtenidos vía ingeniería genética. Sólo en el caso de la mejora en la capacidad de fijación biológica de nitrógeno se evaluaron dos tipos de plantas: leguminosas y no leguminosas.

De todos los escenarios que se presentan en el Cuadro 16, es evidente que la agrobiotecnología contribuirá a un progreso en la producción agrícola. Una conclusión interesante es que si hay un incremento en el gasto de I y D y las políticas de adopción tecnológica son favorables, es decir, si se lograra el escenario con «más tecnología», no habría un cambio significativo en comparación con el escenario «en la actualidad». Sin embargo, si el escenario con «menos tecnología» se cumpliera, entonces sí habría impactos menores en la producción agrícola. Otra conclusión importante es que, en algunos problemas agrícolas, existen técnicas alternativas para lograr el resultado esperado y no habría diferencia ostensible por un mayor o menor uso de las tecnologías.

Biotechnología en el sector agroalimentario: Problemas e implicaciones actuales

Recientemente, investigadores de la Universidad de California publicaron los resultados de una encuesta realizada a veintinueve compañías, dedicadas al desarrollo de agrobiotecnologías, tanto de productos como de procesos derivados de ellas (Hayenga 1988). La consulta se realizó personalmente o por teléfono, y se pidió identificar lo siguiente: nuevos productos obtenidos por agrobiotecnologías que llegarán al mercado a fines del siglo, fecha aproximada en que llegarán al mercado y primera aplicación de estos productos.

También se les solicitó dar su opinión sobre cuáles son las políticas y aspectos regulatorios más importantes que afectan el desarrollo de estos nuevos productos.

Los resultados más relevantes son:

- Durante la presente década, un gran número de productos derivados de las biotecnologías se usarán cotidianamente en la producción y procesamiento de alimentos.
- Algunos productos que llegarán al mercado estadounidense, en los próximos cinco años, se encuentran en pruebas de campo o están cumpliendo con los requisitos del proceso de regulación vigente en ese país. La mayoría de esos productos provendrán de la clonación y del cultivo de células; o bien de las técnicas de ingeniería genética, como es el caso de las plantas transgénicas y productos derivados de bacterias transformadas genéticamente.

Las expectativas de mercado para finales de la década son del orden de US\$2000 millones en ventas.

Horizontes de la biotecnología agrícola

Por el nivel de conocimiento que se tiene sobre la biología molecular de los principales vegetales, es probable que a mediados de esta década sólo hayan llegado al mercado unos cuantos productos. Entre éstos, se pueden identificar los siguientes:

- De control biológico (v. gr. bacterias, virus, hongos). Aumentará su demanda en virtud de la creciente preocupación ante el efecto de los plaguicidas químicos no biodegradables.
- Bioinsecticidas derivados del *B. thuringiensis* con un rango de aplicación más amplio y específico.
- Plantas transgénicas. Se comercializarán plantas y semillas transformadas por *Agrobacterium*. Entre los candidatos pueden citarse: tomate, papa, zanahoria, alfalfa, lechuga, remolacha, espárrago y muchas otras hortalizas. Los cereales transgénicos aún tienen serios problemas técnicos y todavía hay dudas sobre su viabilidad comercial. Entre las características de las plantas transgénicas se incluyen: propiedad de producir su propio insecticida (toxina de *B. thuringiensis*), resistencia a herbicidas, virus y hongos.
- Plantas con características que les confieren mayor valor agregado. Ejemplos: vegetales con contenido de sólidos superior al de especies utilizadas actualmente por la industria, como tomate, papa y ajo. Otros

casos se refieren al sabor, color, "vida en anaquel o estante" ampliada, menor velocidad de maduración.

- Semillas artificiales o encapsulamiento de embriones de plantas clonadas. Empresas comerciales aplican estas técnicas con papas, nueces y dátiles.
- Plantas transformadas por transferencia múltiple de genes que pueden modificar el diseño de las hojas y la eficacia de la actividad fotosintética; aumentar la retención de humedad o tolerancia a la humedad y a la temperatura; e incrementar el rendimiento de los principales granos.
- Producción de drogas, fragancias, colorantes por cultivo *in vitro* de células vegetales transformadas.
- Obtención de especies mejoradas, con mayor contenido de aceites y composición de ácidos grasos similares a la soja, niveles de proteína y composición de aminoácidos similares a los granos de mayor importancia y composición de almidones parecidos a los del maíz y arroz.

Horizontes de la biotecnología pecuaria

Aun cuando el mercado potencial de la aplicación del sector pecuario es mayor que el agrícola, el número de productos es menor. Entre los principales, se pueden citar los siguientes:

- Promotores del crecimiento, hormonas para estimular la producción de leche en ganado bovino y somatotropina, cuyo efecto principal consiste en aumentar la producción de leche entre 15% y 30 por ciento. Otras hormonas, como la somatotropina porcina, tienen un enorme potencial al reducir el contenido de grasa en un tercio, aumentar la carne magra en un séptimo y reducir en un 25% el consumo de alimento por kilogramo de peso ganado en los últimos tres meses de crecimiento;
- introducción de nuevas vacunas obtenidas por ingeniería genética, que fortalecerán la medicina pecuaria. También el uso de anticuerpos monoclonales para el diagnóstico clínico o de contaminantes tendrá una amplia difusión;
- productos similares a los desarrollados para seres humanos se empezarán a aplicar en el ganado, entre ellos, los profilácticos antivirales, antibacterianos e inmunomodulares.

El Cuadro 16 resume los productos principales de la biotecnología agropecuaria y las posibles fechas de introducción en el mercado.

Cuadro 16. Fechas estimadas de factibilidad técnica y disponibilidad comercial de los principales productos de la biotecnología en relación con el sector agropecuario.

Productos	Factibilidad técnica	Disponibilidad comercial
Vacunas producidas por ingeniería genética	1987-1999	1989-1991
Hormonas de crecimiento animal	1986-1987	1989-1991
Anticuerpos monoclonales para diagnóstico de enfermedades animales o condiciones especiales	1986-1987	1987-1988
Interferones/interleukinas	1987-1988	1989-1991
Sistemas de diagnóstico basados en sondas moleculares y otros sistemas biológicos	1986-1987	1988-1989
Modificación genética de animales (líneas somáticas)	1988-1989	1993-1994
Anticuerpos monoclonales para problemas de salud animal (en gran escala)	1988-1989	1988-1991
Nuevos aditivos alimentarios	1987-1988	1989-1991
Medicamentos, antibióticos	1987-1988	1989-1991
Plantas transformadas genéticamente	1985-1989	1993-1996
Nuevos biocidas para uso agrícola	1987-1989	1990-1992

Fuente: Hayenga 1988.

**Leyes de la vida:
Desarrollo y nuevas biotecnologías**

Desde hace varios años Mooney y un grupo de colaboradores en Canadá (Mooney 1983) han venido estudiando y analizando el complejo problema de los recursos genéticos vegetales (Fowler *et al.* 1988). De manera que, al despuntar el gran interés por la agrobiotecnología, se dieron a la tarea de evaluar los impactos socioeconómicos que tendría la aplicación de la biotecnología en el largo plazo; pues, ésta, además de producir variedades mejoradas, modificaría técnicas agronómicas y haría que la práctica agrícola se «industrialice».

Preguntas como: ¿a quién beneficiará este cambio?; ¿cómo evaluarlo anticipadamente?; ¿qué medidas tomar para obtener los beneficios y disminuir los riesgos inherentes? son planteadas y respondidas por los estudios de Mooney.

En su trabajo más reciente, compara la "revolución verde" con la biotecnología agrícola, es decir, caracteriza y analiza el impacto que tuvo la "revolución verde" y lo proyecta hacia las nuevas tecnologías biológicas. En el Cuadro 17 se presenta un resumen de esta comparación.

Cuadro 17. Comparación entre la revolución verde y la revolución genética.

Características	Revolución verde	Revolución genética
Desarrollada por motivación	Humanitaria	Ganancia
Investigación y desarrollo	Sector público	Sector privado
Enfoque	Centralizados	Centralizados
Introducción	Relativamente gradual	Relativamente inmediata
Enfasis	En rendimiento	En insumos y procesamiento
	En cereales	Afecta todas las especies

Nota: 1 billón = US\$ mil millones.

Cuadro 17 (Cont.)

Características	Revolución verde	Revolución genética
Objetivo	Alimentar al hambriento y enfriar las tensiones políticas en el Tercer Mundo, incrementando los rendimientos de la producción de alimentos con fertilizantes y semillas	Contribuir al aumento del margen de ganancias, incrementando insumos y/o eficiencia en el procesamiento
¿Para quién?	El pobre	Accionistas y administradores
¿Quién lo realiza?	CGIAR tiene 830 científicos trabajando en 9 institutos que reportan a 8 fundaciones norteamericanas; países industrializados; agencias cuasi Naciones Unidas	Solo en los EE.UU. hay 1127 científicos trabajando para 30 compañías de agrobiotecnología
¿Cómo?	Fitomejoramiento en trigo, maíz y frijol	Manipulación genética de todas las plantas, animales y microorganismos
Metas principales	Cereales enanos; respuestas a fertilizantes	Tolerancia a herbicidas; sustitutos naturales; facilidad en el procesamiento industrial
Inversión	108 millones de dólares para investigación y desarrollo en el sistema CGIAR (1988)	144 millones de dólares en las 30 compañías de agrobiotecnología en EE.UU. (1988)
Impacto general	Sustancial pero gradual, 52.9% del trigo y arroz del Tercer Mundo se produce con variedades mejoradas	Enorme, algunas veces inmediato, 20 billones de dólares en plantas medicinales; sabor/fragancia están en riesgo; comercio internacional del orden de billones de dólares pueden perderse en bebidas, azúcar y aceites vegetales

Cuadro 17 (Cont.)

Características	Revolución verde	Revolución genética
Impacto en el campesino	Acceso desigual a semillas e insumos; pequeños productores pierden tierras a favor de los grandes productores; nuevas variedades aumentan rendimiento pero aumentan riesgo; reducción de precios	Aumento en los costos de producción; pérdida de algunos cultivos industriales; aumento en la eficiencia de insumos y procesamiento postcosecha; sobreproducción y diversificación de materiales
Impacto en las zonas agrícolas	Erosión del suelo por el gran uso de agroquímicos; erosión genética por el desplazamiento de variedades tradicionales; pérdida de especies por sobreplantación de cultivos tradicionales como maíz, trigo y arroz; presión sobre los mantos acuíferos debido a la irrigación; deforestación	Enfasis en la alimentación de países industrializados; mercados segmentados. Aumento en el uso de toxinas biológicas y químicas
Implicaciones económicas	Contribución directa de 10 billones de dólares por año a la producción de alimentos del Tercer Mundo; contribución indirecta de 50-60 billones de dólares por transferencia de genes sólo a EE.UU., contribuyendo a ventas en el campo por 2 billones de dólares anuales en trigo, maíz y arroz	Contribución a la producción de semillas por 12 billones de dólares/año para el 2000; contribución a la agricultura de 50 billones de dólares año para el año 2000; beneficios de recibir recursos genéticos del Tercer Mundo
Implicaciones políticas	Proyectos nacionales de fitomejoramiento disminuidos; agricultura del Tercer Mundo se occidentalizó; no se recibieron beneficios por poseer el germoplasma; dependencia	El sistema CGIAR responde a intereses de corporaciones privadas; materiales genéticos y biotecnologías son controladas por la industria a través de patentes.

Fuente: Fowler 1988.

Lo menos que puede decirse, al revisar el contenido del Cuadro 17, es que la "revolución genética" tendrá mayores impactos importantes y con gran alcance; pero sin duda los beneficios estarán dirigidos a un grupo minoritario, principalmente en los países industrializados.

Además, confirma la tendencia hacia la industrialización de la actividad agrícola y es, en cierta medida, una segunda fase de la "revolución verde", con más bases científicas y mayor participación del sector industrial privado.

Los estudios de Mooney son encarados por un pequeño grupo de no-expertos que, utilizando técnicas de monitoreo y extrapolación de tendencias, generan situaciones futuras. La cobertura de estos estudios es mundial pero hay una clara referencia a su impacto en los países en vías de desarrollo. Otro aspecto distintivo de los responsables de los estudios, es que se trata de un grupo independiente de carácter no gubernamental.

Bioteología e industria alimentaria en Estados Unidos de América

Este estudio fue realizado por una dependencia gubernamental y se refiere específicamente a la industria alimentaria estadounidense (Office of Planning and Evaluation y Center for Food Safety and Applied Nutrition 1988). Se utilizó como metodología la consulta a expertos y se obtuvo la participación de 106 de ellos, provenientes de la industria, academia y gobierno.

En 1986-1987, existían 155 empresas que aplicaban bioteología para el procesamiento de alimentos o para mejorarlos. Estas empresas trabajaban en 400 proyectos de investigación divididos aproximadamente en partes iguales entre agricultura y procesamiento de alimentos. De estos últimos, el 47% buscaba desarrollar nuevos y mejores ingredientes alimenticios; un tercio se dedicaba a mejorar técnicas de procesamiento actuales; y el 20% remanente estaba concentrado en la búsqueda de nuevos alimentos. La mayoría de los proyectos en agricultura giraban alrededor de formas de mejoramiento de la calidad y rendimiento de los principales cultivos.

De las respuestas de los expertos se pudieron identificar las siguientes tecnologías, como las de mayor uso futuro: desarrollo de enzimas por ingeniería genética para el procesamiento de alimentos; detección de contaminantes orgánicos o microbianos en alimentos, bien sea por anticuerpos monoclonales o sondas de ADN; desarrollo de resistencia a plagas en plantas; creación de nuevos y mejores saborizantes; y mejoramiento genético de animales productores de carne y alimentos. Los 106 expertos hicieron el pronóstico de que estas investigaciones producirían resultados tangibles.

En el Cuadro 18 se presentan las fechas estimadas en que técnicamente estarán disponibles los primeros productos; el 95% antes de que finalice la presente década. En contraste, sólo uno de ellos habrá alcanzado el mercado en 1990: uso de anticuerpos monoclonales o sondas de ADN para detectar contaminantes.

Cuadro 18. Fechas estimadas de avances en biotecnología alimentaria.

Producto	Fechas de disponibilidad	
	Técnica	Comercial
Detección de contaminantes orgánicos, microbianos y otras toxinas en alimentos	1987	1989
Plantas resistentes a plagas	1987	1992
Nuevos/mejorados saborizantes y fragancias	1988	1991
Crecimiento, nutrición y reproducción de animales productores de carne y alimentos	1988	1991
Mejoramiento genético de productores de carne y alimento	1988	1993 - 1996
Plantas resistentes a herbicidas	1987	1991
Mejoramiento en el contenido nutricional de plantas	1988	1991
Aumento del rendimiento y características de procesamiento de plantas (alimento)	1988	1991
Aumento en la variedad y en la calidad de plantas (alimento)	1988	1991
Nuevos edulcorantes	1987	1991

Fuente: Office of Planning and Evaluation y Center for Food Safety and Applied Nutrition 1988.

También se hicieron pronósticos con respecto a 1208 productos producidos y/o relacionados con la biotecnología. El Cuadro 19 es un ejemplo típico de los resultados de este estudio, en el cual se revisa el caso de los colorantes y el impacto de las biotecnologías en su obtención.

Cuadro 19. Prospectiva de la obtención de colorantes por medio de la biotecnología.

Producto	Fechas de disponibilidad	
	Técnica	Comercial
Agente colorante vegetal	n.d.	1988
Extractos de pigmentos naturales	1988	1990
Colorantes naturales	1987	1988
Betaína	1988	1991
Colorantes naturales más seguros	1987	1990
Colorantes naturales simulados	1987	1990
Beta-carotenos	n.d.	1987
Colorantes (sin especificar)	1988	1992

Fuente: Office of Planning and Evaluation y Center for Food Safety and Applied Nutrition 1988.

Advance Technology Alert System (ATAS)

El Centro para la Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de las Naciones Unidas (UNCSTD) inició, en 1984, un sistema de alerta tecnológica (Center for Science and Technology for Development 1984) para los países en vías de desarrollo. El objeto principal del sistema consistía en someter a consideración de los decisores, en dichos países, aquellos factores científicos y tecnológicos que pudiesen afectar negativamente el proceso de crecimiento, así como identificar y evaluar cambios tecnológicos de importancia potencial y específica para los países en desarrollo.

Una característica del sistema de alerta tecnológica es la de presentar los nuevos descubrimientos en una etapa temprana y no cuando han alcanzado un

desarrollo que torna muy difícil el acceso a ellos o cuando ya ingresaron en el mercado. El primer tema que se seleccionó fue una de las agrobiotecnologías —tecnología del cultivo de tejidos: vegetales y animales— y, para poder establecer su potencial e impacto futuro, se invitó a un grupo de expertos para que escribiesen capítulos sobre temas específicos. El resultado fue que se obtuvo una publicación interesante, con datos nuevos, y que trató de identificar elementos de interés para los países no industrializados.

Cuadro 20. Rendimientos actuales y potenciales de algunos productos agrícolas.

Producto	Rendimiento actual (t/ha)	Rendimiento potencial (t/ha)
Azúcar de caña	75 - 90	150 - 200
Mandioca (yuca)	15 - 20	60 - 100
Tomate	20 - 40	0 - 100
Aceite de palma	2 - 5	10 - 12
Cacahuete	1.6	4.0
Aceite de castor	0.6	2.5
Madera dura templada	—	30 - 40
Madera dura tropical	10 - 20	40 - 100
Coníferas de clima templado	6 - 8	20 - 30
Coníferas tropicales	12 - 20	40 - 60
Bambú	25	100
Pasto guinea (<i>Panicum maximum</i>)	25	50

Fuente: Center for Science and Technology for Development 1984.

El Cuadro 20 es una muestra de la información que se presentó en este esfuerzo prospectivo. Posteriormente se estableció una red mundial entre los interesados en la biotecnología. El sistema de alerta tecnológica continúa haciendo publicaciones similares en otros campos: electrónica, materiales y otros, pero sin que su impacto en la planeación industrial o científico-tecnológica haya sido relevante.

5

PROSPECTIVA DE LA AGROBIOTECNOLOGIA COMO HERRAMIENTA DE PLANEACION EN AMERICA LATINA

La revisión de las bases metodológicas y el análisis de algunos de los estudios de la prospectiva sobre biotecnología, permiten ahora evaluar en detalle las posibilidades que existen de realizar este tipo de estudios en América Latina e identificar los problemas que se deberán enfrentar.

En principio, hay que considerar tres preguntas fundamentales, que definirán las opciones pertinentes:

- ¿Por qué hacer estudios en prospectiva sobre agrobiotecnologías en América Latina?
- ¿Qué tipo de prospectiva sobre agrobiotecnología es conveniente para América Latina?
- ¿Cómo hacer prospectiva en la región y para ella?

A continuación se presentan algunos elementos que responden a estos cuestionamientos y que, a la vez, permiten anticipar su uso potencial.

Importancia de los estudios prospectivos

El reciente interés por la prospectiva proviene en buena medida del reconocimiento dentro de gobiernos y organismos internacionales de que la planeación a largo plazo de la investigación, es inevitable en una era de creciente competencia en los mercados globales. En efecto, una de las principales preocupaciones gubernamentales en el mundo de hoy es la estructuración de políticas que permitan aumentar la posición competitiva de sus países en el plano internacional.

Desde la Segunda Guerra Mundial, la naturaleza y características de los bienes comerciales está sufriendo un cambio radical, debido en gran parte a las

iniciativas tomadas en el lado de la oferta por parte de gobiernos y empresarios embarcados en la función innovadora. De esta forma, las ventajas comparativas y las bases de los recursos se van desagregando de los factores geográficos tradicionales, para irse moldeando de acuerdo con factores de innovación predeterminados por el hombre. La competitividad de un país se va haciendo cada vez más dependiente de la capacidad de innovación, lo cual remite directamente a la actividad de investigación y desarrollo, a recursos humanos calificados y a gastos de inversión de capital.

La aplicación de la biotecnología en el sector agrícola, en el plano internacional, está registrando importantes cambios tecnológicos, siendo uno de los factores fundamentales la aplicación de la agrobiotecnología. Aunque es necesario reconocer que muchos de los resultados son todavía potenciales, aun si sólo se cumpliera una parte de las expectativas, los cambios tendrían importantes impactos en la actividad agrícola de los países latinoamericanos.

Si se acepta que las agrobiotecnologías se desarrollarán y aplicarán masivamente en los próximos diez a quince años, entonces es necesario conocer por anticipado en qué productos y procesos se darán los mayores cambios, cuándo sucederán y qué efectos tendrán en las economías latinoamericanas —sustitución de exportaciones, aumento de importaciones, modificación en la estructura productiva y organizativa de la agricultura y ganadería, u otros.

A lo largo de este documento, se han presentado numerosos ejemplos que ilustran las ventajas y riesgos asociados con las agrobiotecnologías. En el Cuadro 21 se presentan los resultados de una estimación sobre los productos agrícolas que dejarán de ser exportados por los países en vías de desarrollo. Convendría en este caso conocer los productos específicos y cuáles de ellos se producen y exportan en América Latina. Un producto que sufrirá las consecuencias es el café, ahora que muchas empresas, principalmente alemanas, trabajan para producir un sustituto.

Otro elemento importante por considerar consiste en identificar las áreas de investigación que se están desarrollando y los productos agrícolas de interés en América Latina, que no se encuentran en la agenda de los países industrializados. Por ejemplo, la agricultura de temporal y la del trópico no están siendo consideradas como prioritarias, actualmente. Ello significa que los esfuerzos en investigación y desarrollo de la región deberán enfocarse hacia problemas que carecen de interés para otros países.

Como se ha analizado en este documento, uno de los primeros pasos para realizar prospectiva es identificar y diseñar los futuros posibles. Las preguntas que surgen son: ¿cómo se hará esta identificación y diseño?; ¿quién se responsabilizará de la sección de los futuros posibles?; ¿de qué manera se establecerán los objetivos socioeconómicos para la región?; ¿convendría dividir la región en subregiones?

Suponiendo que las preguntas anteriores fuesen contestadas y que hubiese un interés compartido en la región, entonces viene el problema de cómo realizar el estudio. De las metodologías que hasta ahora se utilizan en prospectiva sobre biotecnología, todas presentan serias limitaciones en el contexto latinoamericano.

Monitoreo

La información técnica disponible proviene, en un porcentaje muy alto, de países industrializados; y en general está atrasada e incompleta.

Extrapolación de tendencias

Los datos históricos para los diferentes sectores productivos son inadecuados y, en varios países, inexistentes.

Opinión de expertos

El número de expertos en el contexto nacional, para un tema específico, es reducido; en el orden regional, para algunas áreas, resulta suficiente. Pero, si se trata de un estudio de amplio alcance, la insuficiencia es notoria.

Finalmente deben considerarse la difusión y uso de los resultados de los estudios prospectivos. En una región que no se ha caracterizado por la innovación industrial y, tampoco, por grandes logros en investigación y desarrollo, es un problema determinar hacia quién proyectar los resultados; y, más importante aún, estimar su valor en la toma de decisiones y planeación de actividades relacionadas. Para enfrentar los problemas anteriores existen algunas opciones, las cuales serán presentadas y discutidas a continuación (Recuadro 3).

Alcance

Si se piensa en el plano latinoamericano, un estudio sobre prospectiva para la región se puede visualizar desde la óptica de la cobertura regional hasta la subregional o nacional. Cada una tiene ventajas específicas; pero un problema común reside en que si se divide el estudio en partes, los objetivos pueden ser diferentes, lo que dificultará asimismo integrar los resultados.

Recuadro 3.	Principales opciones para realizar prospectiva en agrobiotecnología en América Latina.
Alcance	Nivel regional. Nivel subregional. Nivel nacional.
Contenido	Impacto socioeconómico de las agrobiotecnologías. Impacto socioeconómico de los campos de aplicación de las diversas agrobiotecnologías.
Responsable	Organismos multinacionales, v.gr., OEA, BID, IICA. Organismos nacionales, v. gr., consejos nacionales de ciencia y tecnología, ministerios de agricultura, comercio, otros.
Realizadores	Grupo consultor nacional. Grupo consultor internacional. Grupo de expertos regionales. Grupo de expertos internacionales.
Metodología	Monitoreo. Método Delphi. Extrapolación de tendencias. Opinión de expertos. Opinión de no expertos.
Resultados	Identificación de áreas de oportunidad para inversión. Identificación de áreas prioritarias para investigación y desarrollo. Identificación de riesgos potenciales para aplicación de biotecnología en la región y fuera de ella.
Fuente: Elaboración del autor 1989.	

Si se considera, a manera de ejemplo, el Grupo Andino (Cuadro 22) y se revisa la situación de su comercio exterior para alimentos, se advierte que es una subregión con una fuerte necesidad de importación de proteínas, almidones y aceites en el orden nacional. Los productos varían en importancia relativa, en comparación con otras subregiones (v. gr. América Central, o países como Brasil, México y Argentina). Si se hiciese un estudio para la región, probablemente, las importaciones de alimentos sean medianamente importantes, pero en los niveles subregional o nacional se encontrarán casos en los cuales la situación es de franca dependencia respecto del exterior y de otros países exportadores netos de alimentos: ¿cómo conciliar esta situación?.

Cuadro 22. Grupo Andino: Comercio exterior de alimentos por categorías (Clasificación FAO). (Promedio por país 1981-1982 en US\$ millones).

Producto	Grupo	Bolivia	Colombia	Ecuador	Perú	Venezuela
Cereales y subproductos	-1 096.5	-54.7	-139.5	-76.0	-261.4	-564.9
Carne y subproductos	-90.0	+0.8	+47.1	-0.4	-43.3	-94.3
Leche y huevos	-290.8	-15.0	-20.8	-5.4	-47.4	-202.2
Fruta y hortalizas	+162.9	-1.0	+96.8	+207.9	+0.3	-141.7
Azúcar y miel	-175.3	+14.3	+73.7	+10.8	-8.4	-265.7
Aceites vegetales y animales	-340.7	-8.5	-121.4	-31.0	-35.9	-143.9
TOTAL	-1 831.3	-65.7	-64.1	+106.7	+395.1	-1 412.1

Fuente: Schudel 1987.

Contenido

El contenido de los estudios prospectivos que se realicen deberá revisar el grado de avance de las agrobiotecnologías en el plano internacional, pero también en la región. De hecho, en años recientes, se han llevado a cabo varios relevamientos sobre las capacidades latinoamericanas en áreas de la biotecnología, aplicadas a la agricultura y la ganadería.

En el Cuadro 23 se muestran los resultados de una encuesta realizada sobre biotecnología, aplicada a la agricultura en América Latina, encontrándose que sólo el 40% de los investigadores tienen entrenamiento de posgrado, principalmente en biología celular; el 88% de las instituciones que respondieron conducen investigación en cultivo de tejidos, mientras que sólo el 23% se especializa en biología molecular. En el primer caso, la investigación se hace en laboratorios poco costosos y se tiene una amplia experiencia en la región, mientras que laboratorios preparados para hacer ingeniería genética de

vegetales son muy escasos en número. Lo anterior será una grave limitación si se desean aprovechar las ventajas de las nuevas agrobiotecnologías.

Cuadro 23. Tecnologías actuales: Uso de las distintas tecnologías en las diferentes áreas de investigación.

Áreas de investigación biotecnológica	Tecnologías	Instituciones(*)	
		(Núm.)	(%)
Celular	Cultivo de tejidos, protoplastos, células, meristemos, anteras, ovarios y otros	72	88
Genética-Citogenética	Cariotipos, mapas genéticos, morfología cromosómica, herencia y otras	38	46
Bioquímica	Purificación y separación de proteínas y ADN en biosíntesis de metabolitos	32	39
Nuclear Inmunología	Mutagénesis, sondas marcadas Anticuerpos monoclonales, pruebas inmunológicas, bioproducción de vacunas	23	28
Molecular	ADN recombinante, clonación de genes, transferencia, regulación y expresión génica	19	23

Notas:

(*) Resultado de 82 instituciones que contestaron el cuestionario.

Fuente: Roca, Amézquita y Villalobos 1986.

En el Cuadro 24 se presentan las áreas de investigación y los productos estudiados en 82 instituciones latinoamericanas. Algunos cultivos para la población de menor ingreso (raíces y tubérculos) e industriales encabezan la lista. Lo anterior es comprensible, ya que estos cultivos son fácilmente manejables por las técnicas de cultivo de tejidos; o bien porque existe

duplicación de esfuerzos por falta de coordinación e información sobre lo que se realiza en la región. Evidentemente existe infraestructura en este campo que debe ser aprovechada.

Cuadro 24. Tecnologías actuales: Organismos que se estudian con mayor frecuencia en proyectos de biotecnología.

Grupos y organismos bajo estudio	Instituciones que estudian cada grupo de organismos*		Proyectos que incluyen cada organismo**	
	(Núm.)	(%)	(Núm.)	(%)
Raíces y tubérculos	34	14.1		
papa			62	7.8
camote			33	4.1
yuca			23	2.9
Industriales	25	10.4		
café			19	2.4
caña de azúcar			17	2.1
palma aceitera			11	1.4
cacao			10	1.3
Frutas tropicales	22	9.1		
plátano/banano			28	3.5
cítricos			11	1.4
Leguminosas de grano	21	8.7		
frijol			35	4.4
Cereales	18	7.5		
maíz			18	2.3
trigo			16	2.0
arroz			11	1.4
Bacterias	***	—		
<i>Rhizobium</i>			31	3.9
<i>E. coli</i>			25	3.1
Hortalizas	13	5.4		
tomate			14	1.8
Hongos	13	5.4		
neuroespora			10	1.6

Cuadro 24 (Cont.)

Grupos y organismos bajo estudio	Instituciones que estudian cada grupo de organismos*		Proyectos que incluyen cada organismo**	
	(Núm.)	(%)	(Núm.)	(%)
Ornamentales clavel	11	4.5	6	0.8
Virus rotavirus	11	4.5	8	1.0
Forestales eucalipto	10	4.1	10	1.3

Notas:

- * Grupos de organismos: citados diez o más veces por diferentes instituciones.
- ** Organismos individuales: citados seis o más veces en proyectos de investigación
- *** No existe información

Fuente: De Janvry, Runsten y Sadoulet 1987.

En forma similar, la investigación sobre biotecnología en animales se encuentra limitada a la fertilización, transferencia de embriones, producción de sistemas de diagnóstico y a algunos esfuerzos en la producción de vacunas (Cuadro 25). También deberá hacer énfasis en los impactos socioeconómicos de las agrobiotecnologías y en su aplicación sobre campos específicos. Un área de especial interés y relevancia para América Latina consiste en revisar y evaluar el futuro de las semillas y de los agroquímicos (biocidas) en el plano internacional, y las medidas que se pueden establecer en la región para aminorar los efectos negativos que se han pronosticado.

Responsables

Para que los estudios prospectivos tengan impacto deberán ser responsabilidad de una institución internacional de prestigio y con ingerencia en los asuntos agropecuarios, a fin de que los resultados sean aceptados y utilizados en los países de la región. Si los estudios fuesen de orden nacional, entonces cada país deberá seleccionar qué ministerio u organismo gubernamental es el más adecuado para desarrollarlo y promover su uso.

Cuadro 25. Biotecnología disponible en América Latina y el Caribe.

Instituto	Salud animal		Producción animal		
	Diagnóstico	Vacunas	Genética reproducción	Nutrición crecimiento	
Argentina	-1	X	X	XG, XR	XN
	-2	X			
	-3	X	X		
	-4				XN
	-5				XN
	-6	X			
	-7	X			
Brasil	-1			XG, XR	
	-2	X	X		
	-3	X	X		
	-4	X	X		
	-5	X	X		
Chile	-1	X		XG, XR	
	-2	X		XG, XR	
Colombia	-1	X	X		
	-2	X	X		
	-3		XR		
Cuba	-1	X	X	XR	XN, XGr
	-2	X	X	XG	
México	-1	X	X	XG, XR	XN
	-2	XR		XG, XR	XGr
	-3			XN	
	-4	X	X		
Uruguay	-1	X	X		
Venezuela	-1	X	X	XG	
	-2	X	XG		XN

Notas:

D: Diagnóstico; V: Vacunas; G: Genética; Gr: Crecimiento; R: Reproducción; N: Nutrición.

Fuente: Schudel 1987.

Realizadores

Con base en la experiencia internacional, y por el tipo de metodología que se requiere, hay diversas opciones para hacer los estudios prospectivos. Uno que parece aconsejable es el de formar un grupo que, sin contar con expertos en el tema, organice un grupo de conocedores de la región pero externos a ella para que —a través de consultas tipo Delphi— pueda diseñar futuros, considerando los aspectos de monitoreo de información y de extrapolación de tendencias. Para eso, debe tener fácil acceso a una buena biblioteca y a un banco de datos internacionales. En realidad, el grupo que realice el estudio deberá ser escogido por el grupo responsable y, en muchos casos, será el mismo grupo que cumple ambas funciones.

Metodología

Aun cuando ya se señaló en el capítulo anterior las metodologías más comunes en este tipo de estudios —por lo general no sofisticadas—, y también se mencionó que estas metodologías para América Latina tienen algunas dificultades y limitaciones, no se considera, sin embargo, que haya que buscar nuevos métodos para hacer prospectiva.

En todo caso será necesario tomar en cuenta que el número de expertos en la región es limitado; en algunas áreas, prácticamente, inexistente; y que muchos de ellos no tienen experiencia en este tipo de consulta. Será necesario contar con el apoyo de expertos internacionales, pero éstos deberán ser seleccionados con mucho cuidado para que respondan a los intereses y objetivos de la región. Otro problema es que la información estadística de los últimos años es inadecuada y para algunas áreas no está disponible en varios países, por lo que la proyección de las tendencias se limita fuertemente. Si se desean identificar productos específicos, entonces la limitación de información podría ser un verdadero «cuello de botella».

Resultados

Debido a la falta de antecedentes acerca de estudios prospectivos en agrobiotecnología, realizados en América Latina, sería conveniente que además de obtener los resultados acostumbrados —descritos en el capítulo anterior—, se pudiese enfatizar en la identificación de oportunidades de negocios para la región y de áreas prioritarias en investigación y desarrollo, con el fin de responder a problemas autóctonos que no están siendo atacados en otros lugares.

Finalmente resulta imprescindible que se obtenga en este tipo de estudios, una visión clara —cuantitativa y cualitativa— de los riesgos que afrontará la región cuando se empiecen a utilizar los recursos agrobiotecnológicos, dentro como fuera de ella. No se puede olvidar que un gran porcentaje de las agrobiotecnologías se aplicarán fuera de América Latina y que ésta será importadora neta de tecnología y productos derivados de ella, lo cual coloca a la región en una posición defensiva, ya que las decisiones sobre las características y tendencias de las agrobiotecnologías se están tomando en empresas transnacionales principalmente.

Sistemas de prospección para países en vías de desarrollo

Desde hace varios años, las organizaciones internacionales, gobiernos de países industrializados y países en vías de desarrollo han intentado establecer un sistema de prospectiva que les sea útil y satisfaga sus necesidades de información para la toma de decisiones inteligente y estratégica.

En el Recuadro 4 se muestran los cinco boletines que, en el plano internacional, han sido establecidos hasta la fecha. No existe ninguna evaluación sobre su eficiencia y menos aún sobre su impacto en los decisores de los países en vías de desarrollo.

Como se puede apreciar, cada boletín es diferente no sólo en la cobertura temática sino también en la frecuencia de publicación. Sin embargo, también, existen algunos rasgos comunes: todos ellos analizan y evalúan el impacto de la biotecnología en los aspectos de patentes, propiedad intelectual, bioseguridad y conservación del medio ambiente.

Algunos de estos boletines están dirigidos a la comunidad técnica, pero casi todos están enfocados hacia los responsables de los programas nacionales de biotecnología; o bien a aquéllos cuya labor consiste en establecer directrices de política y líneas de investigación y desarrollo.

Prospectiva en la planeación

Los estudios prospectivos son un insumo de la planeación, como se señaló antes. Se debe buscar que los mismos aporten elementos para una mejor toma de decisiones y, en ese sentido, la prospectiva tendrá impacto si el decididor acepta que ésta le dé argumentos y datos importantes. Si esta situación no ocurre, entonces el estudio prospectivo es irrelevante.

Recuadro 4. Boletines prospectivos en biotecnología para países en vías de desarrollo.

Biotechnology and Development Monitor

Fecha de inicio:	1989.
Frecuencia de publicación:	Cuatro veces por año.
Organización patrocinadora:	Ministerio de Relaciones Exteriores de Holanda y Universidad de Amsterdam.
Cobertura temática:	Avances en biotecnología por regiones, cultivos, organizaciones internacionales, compañías transnacionales y productos específicos de interés para países en vías de desarrollo.

Genetic Engineering and Biotechnology Monitor

Fecha de inicio:	1982.
Frecuencia de publicación:	Cuatro veces por año.
Organización patrocinadora:	Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUUDI), Viena, Austria.
Cobertura temática:	Noticias sobre política biotecnológica, noticias sobre países, investigación, aplicaciones, patentes y propiedad intelectual, bioinformática, encuestas y eventos, y un artículo sobre temas de interés para países en vías de desarrollo.

Biotechnology and Development Review

Fecha de inicio:	1991.
Frecuencia de publicación:	Cuatro veces por año.
Organización patrocinadora:	Sistema de Investigación de Información para los Países No-Alineados y Otros Países en Desarrollo, Nueva Delhi, India.

Recuadro 4 (Cont.)

Cobertura temática: Desarrollo potencial de la biotecnología en diversas áreas de aplicación, el papel de la cooperación Sur-Sur, pérdidas en productos de exportación, implicaciones de la propiedad intelectual, recursos genéticos vegetales y el medio ambiente.

Advance Technology Alert System Bulletin

Fecha de inicio: 1984.

Frecuencia de publicación: Una vez cada cinco años.

Organización patrocinadora: Centro de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de las Naciones Unidas, Nueva York, Estados Unidos.

Cobertura temática: En cada número se selecciona un tema específico y se invita a expertos internacionales a que presenten artículos, en los cuales señalan el "estado de arte" técnico y las aplicaciones potenciales, así como los impactos socio-económicos.

Boletín de Biotecnología

Fecha de inicio: 1984.

Frecuencia de la publicación: Dos veces por año.

Organización patrocinadora: Asociación Interciencia y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT), San José, Costa Rica.

Cobertura temática: Opiniones sobre temas de política científico-tecnológica de interés para los países de América Latina, en forma de editoriales y opiniones, eventos, descripción de programas nacionales y publicaciones recientes.

Fuente: Elaboración del autor; ONUDI; Ministerio de Relaciones Exteriores de Holanda.

De nuevo es evidente que el decisor aceptará mejor un estudio que estuvo bajo la responsabilidad de una institución de prestigio y preferentemente neutra, desde el punto de vista político.

Otra forma de influir en la planeación de algún sector, en el cual la agrobiotecnología tendrá impacto, es por medio de una amplia difusión de los resultados del estudio, para que en diversos niveles se perciban los riesgos y oportunidades de esta nueva tecnología.

Existe un caso muy interesante que ejemplifica cómo la prospectiva puede ser un factor importante en la planeación del sector agropecuario. La industria azucarera mundial ha sufrido grandes cambios en su estructura productiva, y el azúcar, como producto de exportación, ha sido desplazado por la aparición de nuevos edulcorantes. La industria azucarera no pudo predecir qué productos, como los jarabes con fructosa derivados de almidón de maíz y el aspartamo, sustituirían al azúcar de caña en el mercado estadounidense, a pesar de que se conocía la posibilidad tecnológica de hacerlo con quince años de antelación.

Ahora la industria azucarera latinoamericana está buscando rutas de diversificación y, entre ellas, cita a la biotecnología como una opción de gran importancia.

Conclusiones y recomendaciones

Hay muchas áreas de aplicación de impacto socioeconómico en las que los estudios prospectivos pueden alimentar la planeación de la producción agropecuaria, o bien servir de base para discusiones en campos afines (Junne 1988). Entre éstas, se pueden citar las siguientes:

- Liberación de especies transgénicas en el medio ambiente (National Research Council 1989);
- problemas de bioseguridad asociados con el uso masivo de las agrobiotecnologías (IICA 1988);
- patentes y propiedad intelectual con respecto a especies vegetales y animales (Sercovich y Leopold 1991);
- conservación, intercambio y valoración del germoplasma autóctono (Junne 1988);

- aumento de la dependencia de los países en vías de desarrollo, tanto de países industrializados como de empresas multinacionales (Ominami 1986);
- dificultades en la comercialización de los bienes biotecnológicos (Sercovich y Leopold 1991);
- desplazamiento de mano de obra de países en vías de desarrollo por introducción de productos biotecnológicos (Junne 1988);
- establecimiento de nuevas instituciones nacionales e internacionales con capacidad de evaluar los nuevos productos de la biotecnología, particularmente en el sector agropecuario (IICA 1988).

Se recomienda la realización de estudios prospectivos en agrobiotecnologías en América Latina. Para ello, caben analizar otros casos de reciente ejecución, como el estudio del Banco Mundial para asignar recursos de inversión en diez países inicialmente. Ese estudio ha desempeñado, además, el papel de identificar los mecanismos e instituciones mediante los cuales deberá hacerse la transferencia de recursos y los proyectos que se han de apoyar. Aparentemente su decisión es que las acciones se canalicen a través de centros internacionales de investigación agrícola, localizados en todo el orbe. Esta última decisión no es aceptada por todos, ya que significa continuar con la tendencia tecnológica iniciada por la "revolución verde", que muchos grupos y países han criticado. No debe olvidarse que el propio Banco Mundial financia los centros internacionales y, en ese sentido, se considera que su decisión tiene un marcado sesgo.

También se deben explorar otras visiones; entre ellas, se destaca una publicación anual de una empresa consultora estadounidense sobre la industria biotecnológica en ese país. Cada año se hace una revisión sobre los aspectos económico-financieros más importantes de las empresas y se realizan entrevistas a 10 ó 12 expertos sobre el futuro de la investigación, la industria y el comercio asociados con la biotecnología. Otra experiencia que debe ser consultada son los estudios prospectivos de carácter nacional que se realizan en América Latina (Alonso 1990).

Se recomienda establecer un pequeño grupo responsable para realizar estudios prospectivos en la región. Dicho grupo se encargará de organizar el contenido del estudio y de subcontratar, cuando sea necesario, a expertos dentro o fuera de la región para que presenten el estado de avance y las perspectivas de las diferentes áreas científico-tecnológicas. Con respecto a la evaluación de impactos socioeconómicos, se puede aplicar la técnica Delphi para identificar riesgos y posibles oportunidades.

El principal problema que debe resolver este grupo es el de difundir los resultados y hacer que éstos se consideren en los planes de desarrollo agropecuarios de la región y en cada uno de los países. En este aspecto, habrá que ser innovador ya que experiencias anteriores en el plano internacional no han arrojado los resultados esperados.

Una recomendación final sería la de establecer un sistema de monitoreo selectivo de los aspectos más relevantes en agrobiotecnologías:

- avances científicos en especies vegetales y animales;
- nuevas aplicaciones de la biotecnología en el sector agropecuario;
- seguimiento sobre la liberación de especies transgénicas en el medio ambiente en países industrializados;
- estudios sobre impactos sociales y económicos en los países en vías de desarrollo;
- seguimiento sobre la discusión y modificación conceptual de patentes y propiedad intelectual;
- convenios internacionales sobre intercambio y conservación de material genético;
- utilización de las biotecnologías en la mejora y recuperación del medio ambiente; y
- aparición de nuevos productos agrobiológicos para uso agropecuario.

BIBLIOGRAFIA

- ALONSO, A. 1986. México: Rasgos para la prospectiva. Méx., Academia Mexicana de Ingeniería.
- _____. 1990. México 2010: Design, features and progress report. *Futures. The Journal of Forecasting and Planning* (Inglaterra) 355.
- ARROYO, G.; WAISSBLUTH, M. 1988. Desarrollo biotecnológico en la producción agroalimentaria en México: Orientaciones de política. Méx., ONU/CEPAL. LC/MEX/L. 77.
- CENTRE FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT. 1984. ATAS: Tissue Culture Technology and Development. Nueva York, ONU. Bulletin no. 1.
- BIFANI, P. 1988. Biotecnología: Perspectiva general y desarrollos en América Latina. In Informe 1988: Progreso económico y social en América Latina. Washington, Banco Interamericano de Desarrollo.
- BRUMBY, P. 1989. An international perspective on agricultural biotechnology in Asia. In Workshop on Biotechnology (1989, Amsterdam). Society for International Development (SID).
- BULL, A.T.; HOLT, G.; LILLY, M.D. 1982. Biotechnology: International trends and perspectives. París, OECD.
- BURRILL, S.; YOUNG, A. 1988. High technology group. Biotech 89: Comercialization. Nueva York, Mary Ann Liebert.
- _____. 1989. High technology group. Biotech 90: Into the Next Decade. Nueva York. Mary Ann Liebert.
- _____; LEE, K. 1990. Biotech 91: A changing environment. San Francisco, Ernst and Young High Technology Services.
- BUTTEL, F.H.; COWAN, J.T. 1990. Biotechnology in the international context. In ¿Biotecnología para el Progreso Agrícola de México?. B. Suárez (comp.). Méx., Centro de Ecodesarrollo.

- CARVAJAL, R.; VERGARA, J.M. 1985. La alimentación del futuro. Méx., Universidad Nacional Autónoma. v. 1.
- CURTIN, M.E. 1985. Harvesting profitable products from plant tissue culture. *Bio/Technology* 1:649.
- DE JANVRY, A.; RUNSTEN, D.; SADOULET, R. 1987. The biotechnological revolution. In *Technological Innovations in Latin American Agriculture*. San José, C.R., IICA. Program Papers Series no. 4.
- DEMARLY, Y. 1989. Technical aspects of plant biotechnologies. In *Simposio Plant Biotechnologies for Developing Countries (1989, Luxemburgo)*. CTA/FAO.
- ESTUDIOS DEL SIGLO XXI. 1988. In *Foro México 2010*. G.O. Barney, A. Alonso (Comp.). Méx., Fundación Javier Barrios Sierra, Limusa.
- FOWLER, M.W. 1984. Plant-cell culture: Natural products and industrial applications. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews* 2:41-70.
- FOWLER, C. *et al.* 1988. The laws of life: Another development and the new biotechnologies. Suecia, Fundación Dag Hammarskjöld. *Development Dialogue* nos. 1-2.
- GARCÍA, M.; LÓPEZ-MUNGUÍA, A.; QUINTERO, R. (Eds). 1991. *Biología alimentaria*. Méx., Universidad Nacional Autónoma.
- GOTSCH, N.; RIEDER, P. 1989. Future importance of biotechnology in arable farming. *TIBTECH* 7.
- HARDY, R.W. 1985. Biotechnology: Status, forecasts and issues. In *Technological Frontiers and Foreign Relations*. A. Keatley (Ed.). Washington, National Academy Press.
- HARDY, R.F.; GLASS, D.J. 1985. Our investment: What is at stake. *Issues in Science and Technology*.
- HAYENGA, M.L. 1988. Biotechnology in the food and agriculture sector: Issues and implications for the 1990's. University of California, Davis, Agricultural Issues Center. AIC Issues Paper nos. 88-5.

- IICA (INTER-AMERICAN INSTITUTE FOR COOPERATION ON AGRICULTURE). 1988. Guidelines for the use and safety of genetic engineering techniques or recombinant DNA technology. Washington, IICA/OMS/OEA/OIE.
- JUNNE, G. 1988. Incidence of biotechnology advances on developing countries. In *Biotechnology Revolution and the Third World: Challenges and Policy Options*. Nueva Delhi, Research and Information Systems for the Non-Aligned and Other Developing Countries.
- LICHA, I. 1988. La investigación latinoamericana en prospectiva. *Investigación y Gerencia (Ven.)* 21(5):4.
- LINSTONE, H.A.; TURROF (Eds). 1975. *The Delphi method: Techniques and applications*. Massachusetts, Addison-Wesley.
- LOCY, R.D. 1985. Notes on principles and applications: State of art. ATAS. *Bulletin Tissue Culture* no. 1.
- LÓPEZ-MUNGUÍA, A; QUINTERO, R. 1988. Perspectivas internacionales de la biotecnología agrícola. In *Biotecnología para el Progreso Agrícola de México*. Centro de Ecodesarrollo.
- MEADOWS, D.H.; ROBINSON, J.M. 1985. *The electronic oracle: Computer models and social decisions*. Nueva York, Wiley.
- MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES DE HOLANDA; UNIVERSIDAD DE AMSTERDAM. s/f. *Biotechnology and development monitor*.
- MOONEY, P.R. 1983. The law of the seed: Another development and plant genetic resources. Fundación Dag Hammarskjold. *Development Dialogue (Suecia)* 1-2.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1986. *Genetic engineering of plants*. Washington, National Academy Press.
- _____. 1989. *Field testing genetically modified organisms: Framework for decisions*. Washington, National Academy Press.
- NICKELL, L.G. 1985. Products. In *Plant Tissue Culture as a Source of Biochemicals*. Florida, Boca Ratón, CRC.

OECD (ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT). 1989. Economic and wider impacts of biotechnology. París.

OFFICE OF TECHNOLOGY ASSESSMENT OF THE US CONGRESS. 1981. Impacts of applied genetics: Microorganisms, plants and animals. Washington.

_____. 1984. Commercial biotechnology: An international analysis. Washington.

_____. 1986. Technology, public policy and the changing structure of American agriculture. Washington.

OFFICE OF PLANNING AND EVALUATION; CENTER FOR FOOD SAFETY AND APPLIED NUTRITION; USFDA. 1988. Biotechnology and the US food industry. Lancaster, Penn., Technomic.

OMINAMI, C. (Ed). 1986. La tercera revolución industrial: Impactos internacionales del actual viraje tecnológico. In Rial-Anuario 1986. Buenos Aires, Grupo Editor Latinoamericano.

ONUDI (ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL). s/f. Genetic engineering and biotechnology monitor. Viena.

PERSLEY, G. 1989. Agricultural biotechnology opportunities for international development, World Bank Biotechnology Project Papers.

También presentado en : Simposio Plant Biotechnologies for Developing Countries (1989, Luxemburgo). FAO/CTA. Luxemburgo,

QUINTERO, R. 1985. Prospectiva de la biotecnología en México. Méx., Fundación Javier Barrios Sierra, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

_____. 1988. Biotecnología en el grupo andino: Aspectos técnico-económicos. In Encuentro de Biotecnología (2., Cali, Col.). Corporación Andina de Fomento.

_____. 1988. La biotecnología latinoamericana: Oportunidades y desafíos. In La Biotecnología en el Grupo Andino 2000. Caracas, Corporación Andina de Fomento.

- QUINTERO, R. 1989. La biotecnología y el sector agropecuario: Hacia nuevas fronteras. In *Ciclo de Conferencias sobre Microbiología Pecuaria (1)*. Memorias. L. Miranda (Ed). Universidad Autónoma de Chapingo.
- _____. 1990. Las biotecnologías y su posible significado en el producto nacional bruto: El caso de México. Alemania. Desarrollo y Cooperación.
- _____. 1991. Biotecnología. In *México ante las Nuevas Tecnologías: Situación Actual y Alternativas*. P. González-Casanova, L. Corona (Eds). Méx. Universidad Nacional Autónoma.
- RAMÍREZ, F.J. 1977. La técnica Delphi. Méx., Centro de Estudios Prospectivos, Fundación Javier Barrios Sierra. Cuadernos Prospectivos no. 5A.
- RAJNCHAPEL-MESSAI, J. 1988. Cellules végétales en quete de métabolites. BIOFUTUR 23-34.
- RIS (RESEARCH AND INFORMATION SYSTEM THE NON ALIGNED AND OTHER DEVELOPING COUNTRIES). 1988. *Biotechnology revolution and the Third World: Challenges and policy options*. Nueva Delhi.
- ROBERT, M.L.; LOYOLA, V.M. (Eds). 1985. *El cultivo de tejidos vegetales en México*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- ROCA, W.M.; AMÉZQUITA, M.C.; VILLALOBOS, V. 1986. Estado actual y perspectivas de la biotecnología agrícola en América Latina y el Caribe. In *Seminario Internacional sobre Temas Prioritarios y Mecanismos de Cooperación de Investigación Agropecuaria en América Latina y el Caribe*. Cali, CIAT.
- SACHS, V.M. 1980. *Diseño de un futuro para el futuro*. Méx., Fundación Javier Barrios Sierra.
- SALAMI, F. 1989. Gene transfer and its application in plant breeding. In *Simposio Plant Biotechnologies for Developing Countries (1989, Luxemburgo)*. CTA/FAO.
- SASSON, A. 1984. *Biotechnologies: Challenges and promises*. Francia, UNESCO. Sextant Series no. 2.

- SASSON, A. 1988. *Biotechnologies and development*. París, UNESCO, Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation (CTA).
- _____. 1989. *Biotechnologies and developing countries: Present and future*. In *Simposio Plant Biotechnologies for Developing Countries* (1989, Luxemburgo). CTA/FAO.
- SCHUDEL, A. 1987. *Consultancy on biotechnology applied to animal production and health in Latin American and the Caribbean*. Roma, FAO, División de Producción Animal y Salud.
- SERCOVICH, F.C.; LEOPOLD, M. 1991. *Development countries and the new biotechnology: Market entry and industrial policy*. Can., IDRC.
- SHAMEL, R.E.; CHOW, J.J. 1989. *Strategic issues in biotechnology*. *ChemTech*, p. 218-220.
- SMITHSON, L.H. 1988. *Biotechnology: Now and soon*. *ChemTech*. p. 168-173.
- SOIFER, R.J. 1987. *La biotecnología: Bases, técnicas, aplicación y algunos elementos económicos*. In *Seminario sobre Tecnologías Avanzadas en América Latina*. Washington, Banco Interamericano de Desarrollo.
- VAN BRUNT, J. 1988. *Molecular farming: Transgenic animals and bioreactors*. *Bio/Technology* 6:1149.
- VAN MONTAGU, M. 1989. *Plant gene manipulation*. In *Simposio Plant Biotechnologies for Developing Countries* (1989, Luxemburgo). CTA/FAO.

APENDICE A. AVANCES EN BIOLOGIA MOLECULAR VEGETAL

Introducción

La agricultura es una de las más antiguas actividades de la humanidad y su reto permanente consiste en el aumento de la productividad y la calidad de los cultivos. Desde hace varios milenios, el hombre ha modificado el medio ambiente y ha clasificado y seleccionado plantas por sus propiedades nutricionales, medicinales, colonizadoras y cosméticas, entre otras características. Una buena parte del éxito de la agricultura moderna se debe y se deberá, cada vez más, a una integración entre la tecnología novedosa, los programas de fitomejoramiento intensivo y los conocimientos generados por la investigación básica en vegetales.

Las nuevas tecnologías, como el cultivo de tejidos, la ingeniería genética y el conocimiento obtenido del fitomejoramiento y de la selección de plantas mejoradas, ya han incidido en la generación de cultivos que producen sus propios insecticidas, resistentes a herbicidas y tolerantes a plagas. La biotecnología agrícola tendrá un impacto muy grande en la economía mundial y aliviará el deterioro del medio ambiente.

Esta revisión plantea los avances recientes en las nuevas tecnologías y el potencial que generan cada una por separado y entre sí. Probablemente a mediados de la presente década, serán liberados al mercado los primeros vegetales transgénicos. Las pruebas de campo de plantas tolerantes a virus y al ataque de insectos —así como resistentes a herbicidas de amplio espectro— ya se llevan a cabo en países como EE.UU., Francia, Alemania, Bélgica y Japón.

En este documento se revisará el avance en las técnicas de ingeniería genética que permiten la transferencia de genes a plantas —técnicas de transformación vegetal—, con el fin de proporcionar una perspectiva actual de la biotecnología agrícola. A su vez se mencionarán algunos conocimientos recientes de la biología molecular de plantas que tienen o pueden tener impacto en la agroindustria. Entre éstos se incluyen:

- El T DNA del plásmido Ti de *A. tumefaciens* como vector de transformación;

- métodos utilizados para la transformación de células vegetales;
- ingeniería genética de caracteres y secuencias genéticas con potencial en biotecnología agrícola; y
- análisis genético de caracteres multigénicos.

T DNA del plásmido Ti de *A. tumefaciens* como vector de transformación

Aun cuando el fitomejoramiento y el cultivo de tejidos podrían considerarse como "ingeniería genética", ya que involucran la manipulación de la información genética hacia la selección de una combinación de caracteres hereditarios deseados, no es sino hasta hace cinco años que ésta surge como tal con el advenimiento de vectores de transformación genética, como el que ofrece la región T DNA del plásmido Ti de *A. tumefaciens* (Herrera-Estrella *et al.* 1983).

Esta bacteria induce la formación de tumores en la corona de virtualmente todas las plantas dicotiledóneas conocidas; sin embargo, los pastos y los cereales que pertenecen a las monocotiledóneas no se encuentran dentro del rango de infección (Recuadro A1).

Afortunadamente ya se han reportado métodos de regeneración a partir del cultivo de anteras y de transformación genética de cereales, utilizando mecanismos alternos como la transferencia directa de DNA o la microinyección de embriones inmaduros derivados de microesporas. También se han podido infectar gimnospermas como los pinos y los abetos, mediante el uso de cepas de *A. hipervirulentas* (Recuadro A1).

Las células de los tumores inducidos por *Agrobacterium* son, en muchos aspectos, análogos a las células cancerosas de organismos superiores, ya que adquieren la propiedad de crecer de una manera independiente y desregulada.

Las células vegetales transformadas, cuando se ponen en cultivo, son capaces de crecer en medios sin hormonas, contrariamente a lo que ocurre con las células no transformadas. Estas células permanecen transformadas aun cuando se eliminan las bacterias del cultivo con antibióticos.

Recuadro A1. Plantas transgénicas obtenidas por ingeniería genética con *Agrobacterium*.

ANGIOSPERMAS – Dicotiledóneas

Leguminosas	Crucíferas	Solanáceas	Otros
Soya silvestre (Rich <i>et al.</i> 1988)	Colza (Pua <i>et al.</i> 1987, Leemans <i>et al.</i> com. pers.)	Papa (Rocha-Sosa <i>et al.</i> 1989)	Zanahoria (Sigocki y Owens 1988)
Soya (Hinchae <i>et al.</i> 1988)	Brócoli (Herrera-Estrella <i>et al.</i> com. pers.)	Petunia (Meyer <i>et al.</i> 1987)	Lechuga (Sigocki y Owens 1988)
Frijol (Herrera-Estrella <i>et al.</i> com. pers.)	Arabidopsis (Feldman 1989)	Tabaco (De Block <i>et al.</i> 1987)	Pepino (Sigocki y Owens 1988)
<i>Stylosanthes</i> (Manners 1988)		Tomate (Sheehy <i>et al.</i> 1988)	Chopo (Plythound <i>et al.</i> 1987)
Lotus (Jensen <i>et al.</i> 1986)		Chile (Herrera-Estrella <i>et al.</i> com. pers.)	Nogal (McGranaham <i>et al.</i> 1988)
Alfalfa (Deal <i>et al.</i> 1987)		Tomate de cáscara (Herrera-Estrella <i>et al.</i> com. pers.)	<i>Fragae</i> (Lohn y Rao 1988)
Sesbania (Vlachova <i>et al.</i> 1987)			Girasol (Everett <i>et al.</i> 1987)
Vigna (Kohler <i>et al.</i> 1987)			Lino (Jordan y McHuguen 1988)
Trébol (White y Greenwood, 1987)			Remolacha (Leemans <i>et al.</i> com. pers.)
			Algodón (Firoozabady <i>et al.</i> 1987)

Recuadro A1 (Cont.)

Monocotiledóneas

Espárrago (Bytebier *et al.* 1987), *Chlorophytum* y narciso (Hooykaas *et al.* 1984) son las únicas monocotiledóneas transformadas vía *Agrobacterium*

Arroz (Luo y Wu Ray 1988)

Maíz (Rhodes *et al.* 1988)

Centeno (De la Peña *et al.* 1987)*

GIMNOSPERMAS

Coníferas

Pino (Sederoff *et al.* 1986)

Abeto (Dandekar *et al.* 1987).

* Se transforman por otros métodos (ver Recuadro A2).

Este hecho sugirió la presencia de un agente tumorigénico en el sistema. Este agente reside en un plásmido de gran tamaño que tiene la bacteria y que se conoce como plásmido Ti. Al fragmento del plásmido Ti que induce la transformación se le conoce como T DNA y es transferido al núcleo de la célula vegetal (Fig 1A). En el T DNA se encuentran los genes que participan en la síntesis de hormonas vegetales, con lo cual se explica el carácter hormono-independiente del cultivo transformado (Fig A1).

También se encuentran en el T DNA los genes de la biosíntesis de opinas, que son metabolitos derivados de aminoácidos. Las opinas se producen en grandes cantidades en las células transformadas y sólo pueden ser catabolizadas por el propio *Agrobacterium*. Los genes del catabolismo de opinas están localizados en otra región del plásmido Ti. Estos plásmidos se han clasificado de acuerdo con el tipo de opina que codifican: octopina, nopalina, agropina, rizopina y otras (Zambryski *et al.* 1983).

En los últimos cinco años se ha generado una gran cantidad de vehículos de clonación, usando T DNA como sustrato para introducir genes exógenos en el núcleo vegetal. Las regiones del T DNA donde pueden clonarse estos genes recombinantes son indispensables para la transferencia y la transformación —una de éstas es precisamente la síntesis de opinas. También se han generado vectores conocidos como "vectores desarmados", los cuales tienen T DNA suprimidos de la región de síntesis de hormonas o región oncogénica. Estos no inducen la formación de tumores pero son todavía capaces de ser transferidos al genoma vegetal (Zambryski, Tempé y Shell 1989). Los vectores desarmados llevan genes bacterianos de resistencia a antibióticos, con los cuales es posible hacer una selección positiva de las células o tejidos transformados (Zambryski *et al.* 1983).

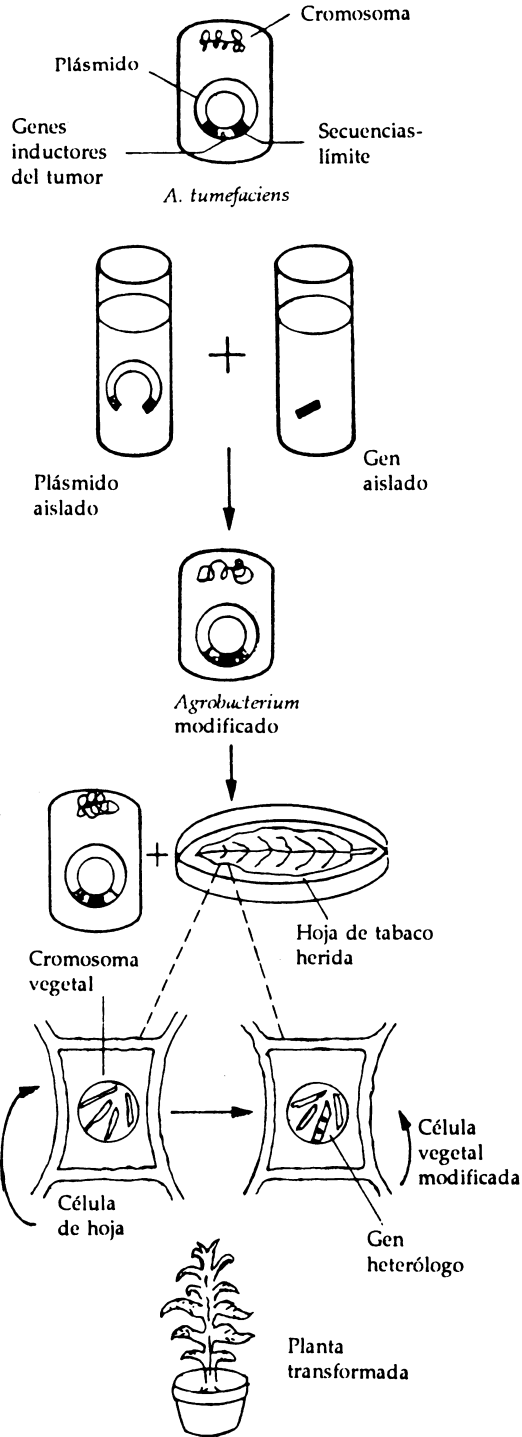


Fig. 1A. Transformación vegetal vía *Agrobacterium*.

La inserción del T DNA se produce al azar y puede ocurrir en múltiples sitios del genoma vegetal (en eventos independientes), lo cual en algunos casos permite usar dicha inserción para generar mutantes y aislar genes de plantas (Feldmann *et al* 1989). Si bien es cierto que el T DNA es el vector de elección en la mayoría de las dicotiledóneas conocidas, como puede observarse en el Recuadro A1, también es evidente que el rango de infección de *Agrobacterium* no cubre a las monocotiledóneas; con dos excepciones a la regla general, ya que ambas plantas son monocotiledóneas de la familia de Liliaceae, como los espárragos y los narcisos.

A pesar de que existen experimentos que demuestran que, bajo ciertas condiciones, *Agrobacterium* es capaz de mediar la transferencia de DNA a células de cereales, en particular se han podido transmitir infecciones virales en lo que se conoce como "agroinfección". Sin embargo, no ha sido posible obtener cereales transgénicos a partir de tejidos tratados con cepas de *Agrobacterium* modificadas por ingeniería genética. Esto se debe probablemente a que la transferencia génica de *Agrobacterium* requiere que las células vegetales se hallen en un estado específico de competencia.

Dicho estado ocurre en la células adyacentes al tejido dañado, como parte de la "respuesta a herida". Un aspecto de este proceso es que las células diferenciadas pierden su diferenciación. En cereales, a pesar de que el DNA puede ser transferido e inclusive integrado a las células adyacentes a la herida, éstas no producen clones celulares transgénicos porque no proliferan. Las escasas células competentes que proliferan se encuentran en meristemos de cereales y no parecen muy accesibles a la infección o son poco competentes para la transformación (Potrykus 1989). Por lo tanto, es conveniente mencionar algunos vectores y técnicas opcionales a la transformación con *A. tumefaciens* para la introducción de material genético en plantas, poniendo un énfasis particular en el caso de los cereales.

Otros métodos utilizados para la transformación de células vegetales

El uso exitoso de estas técnicas opcionales de transformación ha permitido obtener cereales transgénicos. Esto se debe principalmente a que los cereales se han podido regenerar a partir de cultivos de anteras y de embriones inmaduros derivados de microesporas. También se han utilizado con éxito algunas leguminosas, como la soja que, a pesar de ser dicotiledóneas, resultan recalcitrantes a la regeneración (Potrykus 1989).

En el Recuadro A2, se ha resumido en primer término el potencial de uso de genomas virales como vehículos de transformación y expresión en plantas. De éstos se mencionan dos casos. En primer lugar, el virus del trigo enano (*Wheat Dwarf Virus*) como posible vehículo para cereales, ya que infecta la mayoría de las gramíneas. Este, al igual que todos los géminivirus, posee dos partículas virales gemelas, que llevan una hebra circular de DNA de hélice sencilla negativa (-) en una cápside, y una positiva (+) en la otra. Mutantes de la hebra (-) interfieren con la replicación del virus, pero en la (+) hay varias ORF (fases de lectura abierta –*Open Reading Frames*–) que no son vitales para la replicación y, por lo tanto, lo convierten en un vehículo potencial para gramíneas (Recuadro A2).

Recuadro A2. Vectores y métodos de transformación alternativos al T DNA y a la infección por *Agrobacterium*.

I. Potencial de usar genomas virales como vehículos de transformación y expresión en plantas:

a) Virus de DNA:

- Géminivirus (*Wheat Dwarf Virus*) WDV (Matzei *et al.* 1988).
- Tomato Golden Mosaic Virus (TGMV) (Hayes *et al.* 1988).

b) Virus de RNA:

- Virus del mosaico del tabaco (TMW) como vehículo de expresión transitoria en plantas (Biosource Genetics 1989).

II. Transformación de plantas por métodos opcionales:

a) Micro-rayo láser
(Weber 1988)

b) Microinyección
(Potrykus 1988;
Reich *et al.* 1986)

**c) Transferencia directa
del DNA (Negrutin *et al.*)
1987; Karesch *et al.*
1988).**

d) Electroporación
(Fromm *et al.* 1987)

e) Liposomas
(Nunt *et al.* 1988)

f) Transplante de núcleos
(Saxena y King 1988)

g) Microproyectiles
(Klein *et al.* 1988;
McCabe *et al.* 1988)

Fuente: Elaborado por los autores con base en las referencias arriba mencionadas).

El segundo caso es un géminivirus de tomate, conocido como el Virus Dorado del Mosaico del Tabaco (TGMV o *Tomato Golden Mosaic Virus*). En éste, ambas hebras + y - han sido clonadas, secuenciadas y analizadas por mutagénesis *in vitro*. Este análisis indicó que sólo el gen de la proteína de la cápside no es esencial para la replicación y para la infección (región AR1).

La introducción por agroinfección de un virus que lleva grandes supresiones del gen de la cápside, induce síntomas muy débiles de la enfermedad. Sustituciones de la AR1 por el gen bacteriano de la neomicina fosfotransferasa causaron una amplificación del gen y de la actividad enzimática (Recuadro A2).

En este punto, valdría la pena mencionar la expresión transitoria en plantas por medio de virus de RNA. Esto **no** constituye una transformación propiamente dicha, es decir, el blanco de la transformación no es el núcleo de la célula, sino el citoplasma; y sólo ocurre expresión genética en un lapso corto. Un representante de este tipo de vector puede ser el Virus del Mosaico del Tabaco (TMV) o el Bromovirus del Mosaico del Tabaco (BMV).

La aplicación de esta tecnología puede ser ejemplificada por el trabajo que realiza la compañía Biosource Genetics, la cual sobreproduce la melanina en células vegetales, usando vectores de RNA (Knight 1989). El vector de Biosource es un vector de expresión transitoria célula-célula y no pasa a la progenie. Desaparece después de unas semanas, pero es suficiente para expresar la proteína o proteínas que se deseen en grandes cantidades.

Entre otros métodos físicos opcionales de transformación genética que reporta la literatura, se encuentran: el microrrayo láser, que permite la introducción de DNA en células intactas y la micromanipulación de células, organelos y cromosomas vegetales. Lo novedoso de este método, a pesar del alto costo del equipo, es que la pared de la célula vegetal no representa un obstáculo para la introducción del DNA clonado en células vegetales.

También, para que haya transformación de organelos, existe la barrera de una doble membrana que el DNA tendría que atravesar, lo cual tampoco impone una limitación con este método. Este tipo de microrrayo puede usarse para el rango inframicrométrico y emplea un láser de nitrógeno (337 nm de longitud de onda y 5 ns de duración del pulso), acoplado al sistema óptico de un microscopio invertido. Se usaron células de *Brassica napus* (L.) con los siguientes resultados (Recuadro A2):

- Introducción de DNA dentro de las células y de microesporas, a través de un hoyo en la pared y membrana plasmática, generado por un pulso único del láser.
- Perforación de cloroplastos *in celula* por varios pulsos de láser e incorporación del DNA dentro del organelo.
- Microdissección de cromosomas de célula sincronizados en metafase.

Microinyección

La microinyección de embriones en etapas tempranas, derivadas de microesporas, surge de la búsqueda de sistemas alternativos de transformación de alta eficiencia para monocotiledóneas y dicotiledóneas, que no sean accesibles a la transformación con *Agrobacterium*, ya sea por estar fuera del rango de infección o porque no se pueden regenerar fácilmente plantas de protoplastos. En particular, este sistema ha sido muy exitoso en la transformación de cereales, ya que la regeneración de éstos a partir de protoplastos es sumamente complicada para fines prácticos. La microinyección de proembriones derivados de microesporas ha abierto un nuevo enfoque para aquellas plantas que puedan regenerarse del cultivo de anteras (Recuadro A2), (Feldmann *et al.* 1989; Potrykus 1989).

Entre los cereales que se han podido regenerar se encuentran: trigo, arroz, cebada y maíz; aunque, en el último caso, a pesar de existir varios reportes en la literatura, no gozan de una amplia credibilidad entre la comunidad científica internacional (Prioli y Sondhal 1989).

Transferencia directa de DNA con MgCl₂-Polietilenglicol (PEG) a protoplastos

En *A. thaliana* hubo transformación con muy alta eficiencia para el caso de protoplastos (Recuadro A2), (Knight 1989). La transformación directa de protoplastos es, en algunos casos, tan eficiente como la transformación por electroporación y mucho más sencilla y factible de reproducción; pero tiene un inconveniente: la toxicidad del lote de PEG puede variar y abatir los niveles de transformación.

Electroporación

Ya es un método clásico para la introducción de DNA, RNA y proteínas en protoplastos —células vegetales desprovistas de su pared celular— y organelos, mediante un pulso eléctrico (Recuadro A2), (Prioli y Sondhal 1985).

Liposomas

Constituyen en general un sistema poco eficiente por la cantidad tan elevada de nucleicos requerida. Podrían tener algunas ventajas con sistemas altamente regenerables de protoplastos, en donde la electroporación o la transferencia directa con PEG no funciona muy bien (Recuadro A2), (Metraux *et al.* 1989).

Trasplante de núcleos

Se han podido trasplantar núcleos de *B. nigra* a un auxótrofo de pantotenato de *Datura innoxia*. La introducción de núcleos se llevó a cabo por una combinación de 0.1 M CaCl₂, 30% polietilenglicol y 0.55 glicina pH 6.8. El trasplante nuclear puede ser útil por crear variabilidad genética en cultivos altamente trabajados, que hayan sido cruzados hasta el punto de que la inducción de variabilidad genética por métodos convencionales sea muy difícil.

Dentro de este mismo tema, también se ha usado la cocentrifugación de células para introducir núcleos y material citoplásmico de una célula a otra. Este método no implica remover totalmente la pared celular (Recuadro 2), (Metraux *et al.* 1989). La técnica llamada LB (*Longevity ud*) fue diseñada en el Chegdu Institute of Biology y ha permitido generar plantas híbrido-somáticas de tabaco y espinaca.

Transformación mediante microproyectiles

Klein y asociados, de la Universidad de Cornell, el USDA y la Compañía Pioneer Hi-Breed International han descrito el uso de microproyectiles de alta velocidad para transferir el gen de la cloranfenicol acetil transferasa (CAT) a células intactas (no protoplastos) de maíz. Igualmente en la Pioneer se ha introducido el gen de resistencia a kanamicina y de la betaglucoronidasa en hojas intactas de tabaco, bombardeándolas con microproyectiles de tungsteno cubiertos de DNA. Ambas actividades enzimáticas se observaron en plantas transgénicas regeneradas y en su progenie.

Recientemente, la compañía Agracetus ha podido transformar en forma estable la soja, por medio de partículas de oro recubiertas de DNA, las cuales fueron aceleradas por una descarga eléctrica, usando como blanco meristemos inmaduros de semillas de soja. Aproximadamente el 2% de los tallos derivados de estos meristemos —vía organogénesis— resultaron ser quimeras para el gen introducido (Recuadro 2A), (Lamb *et al.* 1989).

Los objetivos a largo plazo de la investigación básica en el plásmido Ti y en otros mecanismos de transferencia de información genética, con el objeto de incrementar los rendimientos y propiedades de los cultivos, así como de generar sondas moleculares —armas muy poderosas para estudiar la organización del genoma y para entender en el nivel molecular los procesos fundamentales de la biología celular y del desarrollo en plantas (Feldmann *et al.* 1989)— consistirán en: proveer a los fitomejoradores herramientas para introducir genes deseados en sitios específicos del genoma vegetal, lo que se conoce como recombinación homóloga (Gal *et al.* 1988).

Ingeniería genética de caracteres y secuencias genéticas con potencial en biotecnología agrícola

La aplicación de la tecnología de transformación, antes mencionada, ha tenido éxito para generar plantas transgénicas, que presentan un retardo en la aparición de síntomas de infección viral, al expresar el gen de la proteína de la cápside un virus similar al que se quiere dotar con protección cruzada (Recuadro A3).

La inmunidad cruzada de virus en las plantas se ha descrito desde hace mucho tiempo; básicamente consiste en prevenir la infección de una cepa muy agresiva de un virus, mediante la previa infección de las plantas por un tipo de cepa similar pero menos virulenta. Por medio de técnicas de ingeniería genética se ha podido inducir inmunidad cruzada al virus del Mosaico Común del Tabaco, por expresar, mediante la infección con *Agrobacterium* de la proteína de la cápside del virus del Mosaico del Tabaco.

En particular, Frealy de Monsanto y Beachy de la Universidad de Saint Louis (Missouri) pudieron expresar la proteína de la cápside del virus del Mosaico del Tabaco (CP), la cual puede llegar a ser hasta el 0.1% de la proteína soluble extractable.

Esto no parece ser tóxico para la planta ni parece disminuir el crecimiento sensiblemente, y sí, en cambio, conferir una protección o disminución de síntomas de la infección del virus hasta en un 90 por ciento. La protección cruzada también funciona hasta en un 70% con el virus del Mosaico de la Alfalfa (AIMV), el cual es muy diferente en cuanto a morfología, estructura, expresión génica y pasos de infección. Esto sugiere que este mecanismo de protección cruzada es un método, generalmente, aplicable para inducir resistencia a infecciones virales en plantas (Recuadro A3), (Rogers *et al.* 1986).

Recuadro A3. Alternativas para generar plantas transgénicas tolerantes a infección por virus

- Expresión del gen de la proteína de la cápside (CP) de un virus en plantas transgénicas.

La CP del TMV (virus del Mosaico del Tabaco) confiere tolerancia a TMV y a ToMV (virus del Mosaico del Tomate) en tabaco y tomate, respectivamente; hay un 95% de "resistencia" en comparación con el 1% en plantas de control (Nelson *et al.* 1988).

La CP del AIMV (virus del Mosaico de la Alfalfa) protege contra la infección a TMV y a ToMV en tabaco y tomate (Nilgun *et al.* 1987; Loesch-Fries *et al.* 1987).

Protección a cultivares comerciales de papa contra PVX (virus X de la Papa), (Hoekema *et al.* 1989).

- Reducción de la severidad de síntomas de infección viral por la expresión del satélite de RNA en plantas transgénicas, del virus del Mosaico del Pepino (SCMV), (Harrison *et al.* 1987) y del Satélite del virus Anular del Tabaco STobMV (Gerlach *et al.* 1987).
- Expresión de antimensajero en regiones importantes para la replicación del virus (no existen informes todavía).

Fuente: Elaborado por el autor con base en las referencias arriba mencionadas.

Resultados muy similares se han reportado por Agrigenetics Advanced Science Company (Recuadro A3), (Zambryski, Tempé y Shell 1989) y por la compañía holandesa Mogen International, donde se anunció recientemente la protección de dos cultivares comerciales de papa contra el virus X de la Papa (PVX) (Recuadro A3), (Zambryski *et al.* 1983).

Otro mecanismo alterno, pero quizás más problemático por sus implicaciones de bioseguridad y ecología, es la protección de la infección viral por medio de la expresión en los satélites de RNA, mediante la introducción de *Agrobacterium*.

Los satélites de RNA incluidos en la cápside del virus, dependen completamente del virus para su replicación y transmisión; sin embargo, su secuencia nucleotídica no está relacionada esencialmente con la del genoma viral.

El mecanismo por el cual los satélites se seleccionan para ser incluidos dentro de la cápside del virus no se conoce; pero resulta claro que ciertos satélites reducen marcadamente la severidad de los síntomas de la infección viral. Tal es el caso del virus del Mosaico del Pepino (CMV) y del virus Anular del Tabaco ToRV (*Tabaco Ringspot Virus*) y su satélite StovRV (Recuadro A3), (Feldmann *et al.* 1989; Potrykus 1989).

Tanto el método anteriormente descrito para expresar la proteína de la cápside como la expresión del satélite de RNA tienen ventajas y desventajas. En el primer caso es necesario expresar altos niveles de proteína y la inducción debe ser constante, aunque aparentemente ya existen planes para fusionar el gen con promotores de genes inducibles por herida; por ejemplo, los genes que codifican para proteínas relacionadas con patogenicidad PRs (Metraux *et al.* 1989) o respuesta por defensa, que es la vía del fenilpropanoico (Lamb *et al.* 1989).

La segunda opción plantea el riesgo de que por mutación se produzcan síntomas más severos. De hecho, también se han descrito satélites hipervirulentos. Ambos métodos dan una protección contra virus muy relacionados con el virus blanco inicial, pero es posible que en un futuro se generen diferentes construcciones de proteínas de la cápside (CP) y satélites para grupos más extensos de virus.

Una alternativa, que podría superar las estrategias antes mencionadas, es el uso de plantas transgénicas que expresen antimensajes contra regiones del virus esenciales para su replicación. Aunque Plant Genetics Systems ya está probando esta alternativa, no parece haber una solución "mágica" y la respuesta es muy variable, dependiendo de la secuencia escogida (ver más adelante antimensajeros y retardo en la maduración del fruto del tomate).

Entre los caracteres recientemente introducidos en plantas transgénicas —que les confieren gran potencial para ser comercializadas— se encuentra la resistencia a herbicidas. En este aspecto, se podría mencionar que se han reportado tres estrategias para inducir resistencia a herbicidas en plantas.

Una primera estrategia ha consistido en sobreproducir en plantas transgénicas la "enzima blanco" de acción de un herbicida en particular. Tal es el caso de plantas transgénicas resistentes a glifosato por la expresión del gen silvestre, que codifica para la sintetasa del 5-enol-piruvil-shikimato-3 fosfato (EPS), (Recuadro A4), (Herrera-Estrella *et al.* 1983).

Otra estrategia parecida a la anterior ha consistido en expresar en plantas transgénicas un gen que codifica para una forma mutada de una enzima, que resulta más resistente al herbicida; así se han descrito plantas transgénicas

resistentes a derivados de la sulfonilurea por expresar sintetasa de acetolactato, que conservan actividad pero que son más resistentes a la inhibición (Recuadro A4), (Rogers, Horsch y Frealey 1986). También se han reportado plantas transgénicas que expresan genes mutados de la EPSP y que confieren tolerancia contra el glifosato (Recuadro A4), (Feldmann *et al.* 1985).

Finalmente se han utilizado genes que codifican para enzimas que detoxifican herbicidas por modificarlos químicamente, como es el caso de la monoxigenasa del 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) (Recuadro A4), (Potrykus 1989), de la acetiltransferasa de la fosfinotricina (PPT) y del bialafos (Recuadro A4), (Knight 1989; Prioli y Sondhal 1989).

Recuadro A4. Plantas transgénicas resistentes a herbicidas.

- Sobreproducción en plantas transgénicas de la "enzima blanco" de un herbicida.
 - Resistencia a glifosato por la sobreproducción del gen silvestre de la sintetasa del 5-enol-piruvil-shikimato-3 fosfato (EPS), (Shah *et al.* 1986).
- Expresión en plantas transgénicas de una forma mutada de una "enzima blanco" del herbicida.
 - Resistencia a derivados de la sulfonil-urea por expresión de la sintetasa de acetolactato (Chalef y Ray 1984).
 - Resistencia a glifosato por expresión de la enzima mutada que codifica el gen bacteriano *aroA* en tabaco (Comai *et al.* 1985; Fillatti *et al.* 1987).
 - Resistencia a glifosato por la expresión en cloroplasto del gen bacteriano mutado que codifica para la 5-enol-piruvil-shikimato-3-fosfato sintetasa (EPSP) resistente (Della-Cioppa *et al.* 1987).
- Expresión en plantas transgénicas de enzimas detoxificantes que modifican o degradan herbicidas, tanto selectivos (2,4-D), como de amplio espectro (fosfinotricina).
 - Resistencia en tabaco al 2,4-D' por la expresión del gen bacteriano que codifica para la monoxigenasa del 2,4-D (DPAM), (Streber *et al.* 1989).
 - Resistencia en tabaco, papa y tomate a fosfinotricina (PPT) y bialafos por expresión del gen bacteriano que acetila la PPT (PPT acetil transferasa = PAT), (De Block *et al.* 1987; De Greef *et al.* 1989).

Nota:

* 2,4-Diclorofenoxiacético.

Fuente: Elaborado por el autor con base en referencias arriba mencionadas.

Una de las características más espectaculares que se han podido transferir en plantas por ingeniería genética, es la tolerancia al ataque de larvas de insectos, como puede observarse en el Recuadro A5. Básicamente se han utilizado dos enfoques:

- La expresión de inhibidores de proteasa como es el inhibidor de tripsina del caupí o *cowpea* (CpTI). Hilder y asociados de la Agricultural Genetics Company (AGS, Cambridge, U.K.) reportaron que las larvas de insectos, como por ejemplo *Heliothis virescens* (gusano del tabaco), mueren o no se desarrollan cuando se alimentan de plantas transgénicas que expresan el gen CpTI. Según el mismo régimen de infestación, las plantas no transformadas fueron totalmente defoliadas (Recuadro A5), (Herrera-Estrella *et al.* 1983).

La introducción de estos genes en maíz, arroz y algodón se está llevando a cabo en dicha compañía. Un posible problema de este enfoque es el hecho de que no se sabe si el inhibidor de tripsina puede resultar tóxico para el consumo humano, ya que precisamente son los inhibidores de proteasa algunos de los factores que hacen tóxicas las semillas de muchas leguminosas.

- El otro enfoque consiste en expresar la toxina modificada de *B. thuringiensis* (Bt). Hasta ahora se han reportado plantas transgénicas de tabaco, tomate y algodón (Recuadro A5), (Rogers, Horsch y Frealey 1986; Zambryski, Tempé y Shell 1989; Zambryski *et al.* 1983). Las plantas transgénicas que producían más del 0.004% de la toxina de Bt de la proteína total provocaron el ciento por ciento de mortalidad en ensayos de seis días de ingesta. La actividad específica producida *in planta* fue la misma a la de la toxina encontrada en la bacteria (Bt) cuando esporula.

Estas toxinas transgénicas tienen actividad contra larvas de lepidópteros como *Manduca*. Sin embargo, se han reportado cepas de *B. thuringiensis* que tienen un espectro diferente de actividad insecticida. Algunas son activas contra lepidópteros, como el presente caso, pero otras son específicas de *Diptera* y *Coleoptera*. El futuro apunta a construir genes quiméricos de mayor actividad específica contra insectos económicamente importantes por el daño que ocasionan.

Algunos enfoques que actualmente se llevan a cabo en el Plant Genetic Systems (PGS), se dirigen hacia la obtención de plantas transgénicas con genes de Bt que tienen diferentes especificidades y a la construcción de híbridos con doble especificidad, o la mutagénesis dirigida que produzca variaciones en la especificidad. Recientemente PGS ha descrito un receptor de Bt en el tracto

intestinal de insectos susceptibles a una toxina recombinante híbrida, con doble especificidad a *M. sexta* y a la mariposa de la col (*Pieris brassica*).

Recuadro A5. Plantas transgénicas protegidas del ataque de insectos.

- Expresión de inhibidores de proteasas (CPTI), (Hilder *et al.* 1987).
- Expresión de toxinas modificadas de *B. thuringiensis* (bt2) en plantas transgénicas de tabaco (Vaeck *et al.* 1987), tomate (Fischhoff *et al.* 1987) y algodón (Agricell Report 1989).*
- Potencial de expresar proteínas de la semilla con actividad insecticida (Osborn *et al.* 1988).**
- Potencial de expresar proteínas procesadas o inhibidoras de la maduración de hormonas de insectos en plantas transgénicas (Van Brunt 1987).**

Notas:

* Plantas que expresaban más del 0.004% de la toxina de Bt, daban total protección contra larvas de lepidóptera.

** No se tienen plantas transgénicas.

Fuente: Elaborado por el autor con base en referencias arriba mencionadas.

El sitio de unión de la toxina con el receptor no se ha identificado pero podría conducir a nuevas maneras de tamizar cepas de Bt con nuevas especificidades de toxinas, manipulando su toxicidad. El grupo de Fischhoff, en Monsanto, ha generado plantas transgénicas de tomate, tolerantes al ataque de larvas de plagas de lepidópteros; en este caso, se usó una cepa de Bt var. kurstaki HD-1, probada contra *M. sexta*, *H. virescens* y *H. zea*, atacantes principalmente del tomate, tanto a la planta como al fruto.

Esta tecnología de la toxina de Bt en plantas transgénicas tiene un potencial muy grande de mercado. Sin embargo existen compañías tales como Mycogen Corporation (San Diego, California), que ya utilizan la bacteria de *B. thuringiensis* como un insecticida comercial (M-one®). Este producto recibió la aprobación total de la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency) en sólo tres años, en contraste con los plaguicidas químicos que demandan de siete a diez años para su aprobación comercial. M-one® se usará para el control del escarabajo de la papa de Colorado.

En California, el costo aproximado (incluyendo material, maquinaria, mano de obra) por asperjar contra plagas de tomate, asciende a más de US\$8

millones anuales. Así, por ejemplo, en el caso del tomate de California, existe una gran distinción entre los tomates para mercado fresco y los procesados; aunque los de consumo fresco sólo ocupan el 10% de la superficie total en acres, la aspersión intensiva de Bt incrementa el costo para este cultivo en un 30% del total.

En general, el valor agregado de la tecnología de DNA recombinante será mayor ante las características que beneficien al procesador —o incrementen el valor de la cosecha— que para las que favorezcan al productor —reducción de costos—, pero es muy posible que la resistencia a insectos, basada en Bt, llegue a ser una característica estándar dentro de pocos años.

Se estima que el control químico de plagas de insectos cuesta más de US\$3 billones por año en el mundo, y US\$400 millones se invierten anualmente para el control de plagas de lepidópteros, sólo en EE.UU. En este sentido, hay un gran número de compañías que se inclinan más por un control biológico que por el uso de plaguicidas químicos.

Los agentes de control biológico tienen características plaga-específicas y tienden a persistir poco anualmente en el medio. El registro de la patente de un agente biológico no viviente cuesta tan sólo unos miles de dólares, contra los US\$15-20 millones que cuesta ahora registrar un nuevo plaguicida inorgánico. Otros piensan que el control biológico llegará a un punto de balance con los plaguicidas químicos, pero éstos nunca serán sustituidos completamente. Sería conveniente comentar aquí los avances recientes de la neurobiología y su potencial de impacto en la biotecnología agrícola.

El control biológico apoyado en la neurobiología de insectos es un campo nuevo y prometedor. Recientemente, se ha pensado en usar análogos sintéticos de las feromonas de alarma de insectos y se han identificado cerca de veinte diferentes neuropéptidos y neurohormonas de invertebrados que regulan el crecimiento y la homeóstasis.

Los posibles prospectos futuros de estos conocimientos consisten, por ejemplo, en inhibir el procesamiento enzimático de una prohormona para alcanzar su estado activo o inhibir la secreción de la hormona; producir por ingeniería genética análogos inactivos de la hormona; o introducir el gen para una hormona diurética en plantas transgénicas: los insectos que comiesen de la planta expresarían el gen y morirían disecados (Recuadro A5), (Potrykus 1989).

El último enfoque que se incluye en el Recuadro A5, consiste en la posibilidad de generar plantas transgénicas que expresen en la semilla una

proteína de frijol. La arcelina es una de las proteínas de almacenamiento más abundantes que se encuentran en las semillas de frijoles silvestres (*Phaseolus vulgaris* L.). Esta proteína tiene un efecto tóxico en una de las plagas de gorgojo más comunes e importantes de los frijoles cultivados, *Zabrotes subfasciatus*. La transferencia del alelo arcelina-1 a cultivares de frijol o la adición de la arcelina purificada a semillas inducen una alta resistencia a la plaga. El gen de arcelina tiene gran similitud a nivel de secuencia con la fitohemaglutinina, lo cual sugiere que este gen evolucionó hacia un mecanismo efectivo para la resistencia a gorgojos (Recuadro A5), (Feldmann *et al.* 1989).

Existe en este momento un gran interés por parte de muchos biólogos moleculares de plantas en identificar y aislar elementos de transposición endógenos de vegetales. Ya se han descrito varios elementos de control del genoma del maíz: Ac-Dc (Federoff 1989; Federoff, Wessler y Shure 1983) y En/Spm (Masson y Federoff 1989), los cuales fueron estudiados por McClintock, Premio Nobel 1985, y el sistema mutador de Robertson (Mu) (Robertson 1978).

Estos elementos de control podrían ser usados como agentes de transposición al azar para "marcar" genes y así poder clonarlos (Taylor *et al.* 1989). Un elemento de control inserto dentro de algún gen de resistencia a un herbicida o a un antibiótico, clonado dentro de un vector de transformación como T DNA, es un arma genética muy poderosa.

Al ocurrir la transposición se obtiene un mecanismo de mutagénesis generalizada con rastreo específico de la mutación —por ganancia de la resistencia al herbicida o antibiótico— en aquellos organismos en donde el elemento haya transpuesto (Jones *et al.* 1989). Recientemente se han aislado en plantas secuencias nucleotídicas que tienen una gran similitud con los elementos repetidos *Copia* de *Drosophila* (Finnegan *et al.* 1978), que a su vez tienen características parecidas a los retrotransposones o retrovirus.

Estos elementos se "mueven" en el genoma y podrían ser potenciales vehículos de clonación y de transposición, como ocurre en *Drosophila* y en levadura (Adams *et al.* 1987). Tal es el caso de un elemento tipo retrotransposon de *Arabidopsis* (Paterson *et al.* 1988), de tabaco (Grandbastien, Spileman y Caboche 1989) y maíz (Johns *et al.* 1989).

El uso del RNA antimensajero para controlar la expresión genética en plantas

Mediante la ingeniería genética de plantas se ha podido controlar la expresión de la actividad de una de las enzimas que degradan pectina, la

poligalacturonasa (PG), asociada con la maduración del fruto del tomate (Kramer, Sheehy y Hiatt 1989). Esto ha sido posible mediante el uso del RNA antimensajeros, que permiten eliminar una proteína o actividad enzimática.

La introducción y expresión de "genes-antimensaje" por ingeniería genética da como resultado la formación de moléculas híbridas del RNA entre el RNA antimensajero y el mRNA blanco, lo que tiene un efecto de "secuestro" de un RNA mensajero específico (Seehy, Kramer y Hiatt 1988).

Proteínas relacionadas con patogenicia (PRP)

Muchas plantas infectadas con agentes patógenos necrotizantes desarrollan resistencia local o sistemática hacia infecciones subsecuentes. La resistencia inducida está acompañada por varios cambios bioquímicos en la planta hospedera, incluyendo la producción de proteínas relacionadas con patogenicia (PRP).

La acumulación de algunas de estas proteínas ácidas, altamente resistentes a proteasas, correlaciona con la resistencia inducida. De las diez proteasas (PR) de tabaco mejor caracterizadas, dos de ellas (PR-R y PR-Q) tienen actividad de quitinasa; tres (PR-O, PR-N y PR-2) tienen actividad de glucanasa; y B 1-3 y 2 (PR-R y PR-S) son estructuralmente similares al inhibidor de maíz con doble actividad de proteasa y beta-amilasa.

La actividad hidrolítica de algunas de estas proteínas sugiere que tienen un papel importante en degradar las paredes celulares de bacterias y de hongos o exoesqueletos de insectos.

Sin embargo, en forma reciente, se reportó que la expresión constitutiva de dos proteínas PR de tabaco, para las cuales se desconoce una función específica PR-1a y GRP, así como la expresión de la que tiene homología con el inhibidor dual de proteasa y amilasa en plantas transgénicas, no confieren resistencia a infección para el virus del Mosaico del Tabaco (TMV), a pesar de que la infección por este virus correlaciona con altos niveles de esta proteína (Thorst y Huub 1989).

Esto sugiere que probablemente la mezcla y no la expresión individual de estas proteínas PR es lo que confiere la resistencia inducida. Lo que se puede apoyar con un reporte en donde la acción coordinada de la quitinasa y la glucanasa de chícharo, en experimentos *in vitro*, tenían una potente acción inhibidora del crecimiento de hongos (Mauch, Mauch-Mani y Boller 1988).

Potencial para incrementar el rendimiento y regeneración de plantas por ingeniería genética

Usando técnicas de biología molecular, se han podido manipular genes de síntesis de hormonas vegetales de T DNA de *Agrobacterium* (ipt) para elevar los niveles endógenos de citocinina en tejidos de tabaco y pepino. Esto tuvo como resultado la obtención de cultivos transgénicos que producían tallos más numerosos, más grandes y que aparecían más pronto, es decir, el cultivo de tejidos incrementaba su potencial de regeneración (Smigocki y Owens 1988).

Análisis genético de caracteres multigénicos

Si bien se produjeron resultados muy espectaculares en cuanto a la expresión de caracteres novedosos en plantas transgénicas, también es cierto que todos los caracteres antes mencionados son monogénicos. La mayoría de los caracteres constituyen el resultado de la acción de múltiples genes cuya variación continua es modificada por el medio ambiente.

La genética cuantitativa se ocupa de determinar la localización y el número de genes que condicionan tales caracteres cuantitativos, así como de evaluar los efectos de cada gen individualmente. El uso de los mapas completos de ligamento genético, basados en los polimorfismos de los fragmentos de restricción (RFLP), así como la aplicación de nuevos métodos analíticos, han permitido resolver caracteres cuantitativos en factores mendelianos discretos, en una cruce interespecífica de tomate (Paterson *et al.* 1988).

Con esta metodología, se han podido mapear al menos seis *loci* de caracteres cuantitativos que controlan la masa del fruto, cuatro que controlan la concentración de sólidos solubles y cinco para el pH del fruto.

Este avance tan notable facilitará analizar con precisión, desde el punto de vista bioquímico y molecular, los genes individuales que participan en la herencia cuantitativa de caracteres cuantitativos.

Las grandes compañías productoras de semillas realizan un gran esfuerzo en saturar los mapas genéticos de ligamento del maíz con mapas adicionales de RFLP. Estos mapas son patrimonio de la compañía y están cubiertos por patentes.

BIBLIOGRAFIA APENDICE A

- ADAMS, S.E.; MELLER, J.; GULL, K.; SIN, R.B.; TUIITE, M.F.; DIGSMAN, S.M.; KINGNSMAN, A.J. 1987. The functions and relationships of Ty-VCP proteins in yeast reflect those of mammalian retroviral proteins. *Cell* 49:11.
- AGRICELL REPORT. 1989. 12:5.*
- BYTEBIER, B. *et al.* 1987. T-DNA organization in tumor cultures and transgenic plants of the monocotyledon *Asparagus officinalis*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 84:5345-5349.
- CHALEF, R.S.; RAY, T.B. 1984. *Science* 223:1148.*
- COMAI, L. *et al.* 1985. Expression in plants of a mutant aro A gene from *Salmonella typhimurium* confers tolerance to glyphosate. *Nature* 317:741-744.
- DANDEKAR, A.M. *et al.* *Biotechnology* 5:587.*
- DEAL, M. *et al.* *Plant. Sci.* 53, 87, 1987.*
- DE BLOCK, M. *et al.* 1987. *The EMBO Journal* 6:2513.*
- DE GREEF, W. *et al.* 1989. Evaluation of herbicide resistance in transgenic crops under field conditions. *Biotechnology* 7:61-64.
- DE LA PEÑA, A. *et al.* 1987. Transgenic rye plants obtained by injecting DNA into young floral tillers. *Nature* 325:274-276.
- DELLA-CIOPPA, G. *et al.* 1987. *Biotechnology* 5:579.*
- EVERETT, N.P. *et al.* 1987. *Biotechnology* 5:1201.*
- FEDEROFF, N.V.; WESSLER, S.; SHURE, M. 1983. Isolation of the maize-controlling elements AC and Ds. *Cell* 35:235.
- _____. 1989. About maize transposable elements and development. *Cell* 56:181.

* No se incluye título de referencia.

- FELDMANN, K.A. 1989. A dwarf mutant of *Arabidopsis* generated by F-DNA insertion mutagenesis. *Science* 243:1351-1354.
- _____; MARKS, D.; CHRISTIANSON, M.L.; QUATRONO, R.S. 1989. A dwarf mutant in *Arabidopsis* generated by T-DNA insertion mutagenesis. *Science* 243:1351.
- FILLATTI, J.J. *et al.* 1987. *Biotechnology* 7:811-816.
- FINNEGAN, D.J.; RUBIN, G.M.; YOUNG, M.W.; HOGGNESS, D.J. 1978. Repeat gene families in *Drosophila melanogaster*. *CSHSQB* 42:1053.
- FIROOZABADY, E. *et al.* 1987. *Plant Mol. Biol.* 10:105.*
- FISCHHOFF, D.A. *et al.* 1987. *Biotechnology*, 5:807.*
- FROMM, M.E. *et al.* 1987. *Method. Enzymol.* 153:351.*
- GAL, S.; PISA, B.; HOHN, T.; GRIMSLEY, N.; HOHN, B. 1988. Homologous recombination in plants. In *International Congress of Plant Molecular Biology (2., 1988, Jerusalem)*. Proceedings. Abstracts 65.
- GERLACH, W.L. *et al.* 1987. Construction of a plant disease-resistance gene from the satellite RNA of tobacco ringspot virus. *Nature* 328:799-802.
- GRANDBASTEIN, M.A.; SPILEMAN, A.; CABOCHE, M. 1989. Tnt1: A mobile retroviral-like transposable element of tobacco isolated by plant cell genetics. *Nature* 337:376.
- HARRISON, B.D. *et al.* 1987. Virus resistance in transgenic plants that express cucumber mosaic virus satellite RNA. *Nature* 328:799-802.
- HAYES, R.J. *et al.* 1988. In *The Second International Congress of Plant Molecular Biology (1988, Jerusalem)*, ABST. 557.*
- HERRERA-ESTRELLA, L.; DEPICKER, A.; VAN MONTAGU, M.; SCHELL, J. 1983. Expression of chimaeric genes transferred into plant cells using a Ti-plasmid-derived vector. *Nature* 303:209.
- HILDER, V.A. *et al.* 1987. A novel mechanism of insect resistance engineered into tobacco. *Nature* 330:160-163.
- HINCHEE, M.A.W. *et al.* 1988. *Biotechnology* 6:915.*

- HOEKEMA, A. *et al.* 1989. The genetic engineering of two commercial potato cultivars for resistance to potato virus X. *Biotechnology* 7:273.
- HOOYKAAS, G.M.S. *et al.* 1984. *Nature* 311:763.*
- JENSEN, J.S. *et al.* 1986. Nodule-specific expression of a chimaeric soybean leghaemoglobin gene in transgenic *Lotus corniculatus*. *Nature* 321:669-674.
- JOHNS, M.A.; BABCOCK, M.J.; FURSTENBERG, S.M.; FUERSTENBER, M.; FREELING, M.; SIMPSON, R.B. 1989. An unusually compact retrotransposition in maize. *Plant Mol. Biol.* 12:633.
- JONES, J.D.G.; CARLAND, F.M.; MALIGA, P.; DOONER, H.K. 1989. Visual detection of transposition of the maize element activator (Ac) in tobacco seedlings. *Science* 224:204.
- JORDAN, M.C.; MCHUGHEN, ?. 1988. Glyphosate tolerant flax plants from *Agrobacterium* mediated gene transfer. *A Plant Cell Rep.* 7:281-284.
- KARESCH, H. *et al.* 1988. In *The Second International Congress of Plant Molecular Biology (Jerusalem)*. ABST. 133.*
- KLEIN, T.M. *et al.* 1988. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America* 85:4305.*
- KNIGHT, P. 1989. Recombinant melanin expressed in plants. *Biotechnology* 7:20.
- KOHLER, F. *et al.* 1987. *Plant. Sci.* 53:87.*
- KRAMER, M.; SHEEHY, R.R.; HIATT, W.R. 1989. Progress towards the genetic engineering of tomato fruit softening. *TIBTECH* 7:292.
- LAMB, C.J.; LAWTON, M.A.; DRON, M.; DIZON, R.A. 1989. Signals and transduction mechanisms for activation of plant defenses against microbial attack. *Cell* 56:215.
- LOESCH-FRIES, L.S. *et al.* 1987. *The EMBO Journal* 6:1845.*
- LOHN, C.S.; RAO, A.M. 1988. *Experientia* 44:72.*
- LUO, Z.; WU RAY. 1988. *Plant. Mol. Biol. Rep.* 6:165.*

- MCCABE, D.E. *et al.* 1988. *Biotechnology*, 6:923.*
- McGRANAHAM, G.H. *et al.* 1988. *Biotechnology* 6:800.*
- MANNERS, J.M. *et al.* 1988. *Plant Sci.* 55:61.*
- MASSON, P.; FEDEROFF, N.V. 1989. Mobility of the maize suppressor-mutator element in transgenic tobacco cells. *PNAS* 86:2219.
- MATZEI, V. *et al.* In *Second International Congress of Plant Molecular Biology (Jerusalem)*. ABST. 550.*
- MAUCH, F.; MAUCH-MANI, B.; BOLLER, T. 1988. Antifungal hydrolases in pea tissue. II. Inhibition of fungal growth by combinations of chitinase and beta-1, 3-glucanase. *Plant Physiology* 88:936.
- METRAUX, J.P.; BUKHART, W.; MOYER, M.; DINCHER, S.; MIDDLESTEADT, W.; WILLIAMS, S.; PAYNE, G.; CARNES, M.; RYALS, J. 1989. Isolation of a complementary DNA encoding a chitinase with structural homology to a bifunctional lysozyme/chitinase. *PNAS* 86:896.
- MEYER, P. *et al.* 1987. A new petunia flower colour generated by transformation of a mutant with a maize gene. *Nature* 330:677-678.
- MICHELMORE, R. *et al.* 1987. *Plant Cell Rep.* 6:439.*
- NEGRUTIN, I. *et al.* 1987. *Plant Mol. Biol.* 8:363.*
- NELSON, R.S. *et al.* 1988. *Biotechnology*, 6:403.*
- NILGUN, E.T. *et al.* 1987. *The EMBO Journal* 6:1181.*
- NUNT, R. *et al.* 1988. *Plant Mol. Biol.* 10:185.*
- OSBORN, T.C. *et al.* 1988. Insecticidal activity and lectin homology of arcelin seed protein. *Science* 240:207-210.
- PATERSON, A.H.; LANDER, E.S.; HEWITT, J.D.; PATERSON, S.; LINCOLN, S.E.; TANKSLEY, S.D. 1988. Resolution of quantitative traits into Mendelian factors by using a complete linkage map of restriction fragment length polymorphisms. *Nature* 335:721.
- PHYTHOUND, F. *et al.* 1987. *Biotechnology* 5:1323.*

- POTRYKUS, I. 1988. The Second International Congress of Plant Molecular Biology (ISPMB), Jerusalem, Nov. ABST, 57; y Spangenberg, G. idem. ABST. 137.*
- _____. 1989. Gene transfer to cereals: An assessment. TIBTECH 7:269.
- PRIOLI, L.M.; SONDHAL, M.R. 1989. Plant regeneration and recovery of fertile plants from protoplasts of maize (*Zea mays* L.). Biotechnology 7:589.
- PUA, E. *et al.* 1987. Biotechnology 5:815.*
- REICH, T.J. *et al.* 1986. Biotechnology 4:1001.*
- RHODES, C.A. *et al.* 1988. Science 240:204.*
- RICH, E.L. *et al.* 1988. Exp. Bot. 39:1275.*
- ROBERTSON, D.S. 1978. Characterization of a mutator system in maize. Mutation Research 51:21-28.
- ROCHA-SOSA, M. *et al.* 1989. The EMBO Journal 8:23.*
- ROGERS, S.G.; HORSCH, R.B.; FREALEY, R.T. 1986. Gene transfer in plants: Production of transformed plants using Ti plasmid vectors. Methods in Enzymology 118:627.
- SAXENA, P.K; KING, J.J. 1988. Plant Physiol. 132:140.*
- SCOTT, R.J.; DRAPER, J. 1987. Plant Mo. Bio. 8:265.*
- SEEHY, R.E.; KRAMER, M.; HIATT, W.R. 1988. Reduction of polygalacturonase activity in tomato fruit by antisense RNA. PNAS 85:8805.
- SEDEROFF, R. *et al.* 1986. Biotechnology 4:647.*
- SHAH, D.M. *et al.* 1986. Engineering herbicide tolerance in transgenic plants. Science 233:478-481.
- SHEEHY, R.E. *et al.* 1988. Reduction of polygalacturomase activity in tomato fruit by antisense RNA. Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America 85:8805-8809.

- SHILLITO, R.D.; CANSELL, G.K.; JOHNSON, C.M.; DIMAIO, J.J.; HANS, C.T. 1985. Regeneration of fertile plants from protoplasts of elite inbred maize. *Biotechnology* 7:581.
- SMIGOCKI, A.C.; OWENS, L.D. 1988. Cytokinin gene fused with a strong promoter enhances shoot organogenesis and zeatin levels in transformed plant cells. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 85:5131-5135.
- STREBER, W.R. *et al.* 1989. Transgenic tobacco plants expressing a bacterial detoxifying enzyme are resistant to 2,4-D. *Biotechnology* 7:811-816.
- TAYLOR, B.H.; FINNEGAN, E.J.; DENNIS, E.S; PEACOCK, W.J. 1989. The maize transposable element Ac exercises in progeny of transformed tobacco. *Plant Mol. Biol.* 13:109.
- THORST, L.; HUUB, J.M. 1989. Constitutive expression of pathogenesis-related proteins PR-1, GRP, and PR-S in tobacco has no effect on virus infection. *The Plant Cell* 1:285.
- VAECK, M. *et al.* 1987. *Nature* 327:33.*
- VAN BRUNT, J. 1987. *Biotechnology* 5:31.*
- VLACHOVA, M. *et al.* 1987. *Plant Sci.* 53:87.*
- VOYTAS, D.F.; AUSUBEL, F.M. 1988. A copia-like transposable element family in *Arabidopsis thaliana*. *Nature* 336:242-244.
- WHITE, D.W.R.; GREENWOOD, D. *Plant. Mol. Biol.* 8:461-469.*
- ZAMBRYSKI, P.; JOOS, H.; GENETELLO, C.; LEEMANS, J.; VAN MONTAGU, M.; SCHELL, J. 1983. Ti plasmid vector for the introduction of DNA into plant cells without alteration of their normal regeneration capacity. *EMBO Journal* 2:2143.
- _____ ; TEMPE, J.; SHELL, J. 1989. Transfer and function of T-DNA genes from *Agrobacterium* Ti and Ri-plasmids in plants. *Cell* 56:193.

APENDICE B. AVANCES EN LAS TECNICAS DE CULTIVO DE TEJIDOS VEGETALES

Introducción

Dados los avances científicos en los últimos años, se contempla un desarrollo de la agricultura basado en la biotecnología agrícola. Esta se sustenta en los nuevos conocimientos de biología molecular y en los avances de las técnicas de cultivos de tejidos vegetales.

Actualmente es posible identificar, aislar y manipular, entre otros, la información genética contenida en las células vegetales, información que confiere a las plantas características importantes; más aún, es posible transferir esta información genética —transformación— de un organismo a otro de la misma especie —homóloga—; o a un organismo de diferente especie —heteróloga.

Una vez transferida la información genética a la nueva célula o grupo de células, las técnicas de cultivo de tejidos permiten regenerar un organismo adulto con nuevos caracteres (Fig B1). Este hecho convierte el cultivo de tejidos vegetales en la metodología-soporte de la nueva biotecnología vegetal. Y, nos dice, que su desarrollo será de gran trascendencia en los campos del conocimiento básico de los procesos de diferenciación y organogénesis, así como en los aspectos de generación y comercialización de nuevas variedades. Estas nuevas metodologías plantean una perspectiva alentadora para el desarrollo de la agricultura en el mundo, con base en las siguientes consideraciones:

- El número cada vez mayor de conocimientos en las áreas de desarrollo y diferenciación de plantas; interacción planta-microorganismos; interacción planta-suelo; mecanismos moleculares de la formación del fruto y la semilla; efectos ambientales sobre el crecimiento y la diferenciación vegetal; síntesis y regulación de metabolitos secundarios en plantas; y fijación biológica de nitrógeno.
- Los avances en las técnicas de ingeniería genética han permitido aislar e identificar un número cada vez mayor de genes, así como transferir esta información genética a un rango cada vez mayor de especies vegetales.

- El desarrollo de las técnicas de cultivos de tejidos que permiten regenerar una planta adulta a partir de una sola célula (clon) o de prácticamente cualquier tipo de tejido vegetal; y que facilitan la selección de nuevas variedades y su micropropagación en un tiempo significativamente menor que el empleado por las técnicas de fitomejoramiento tradicional.

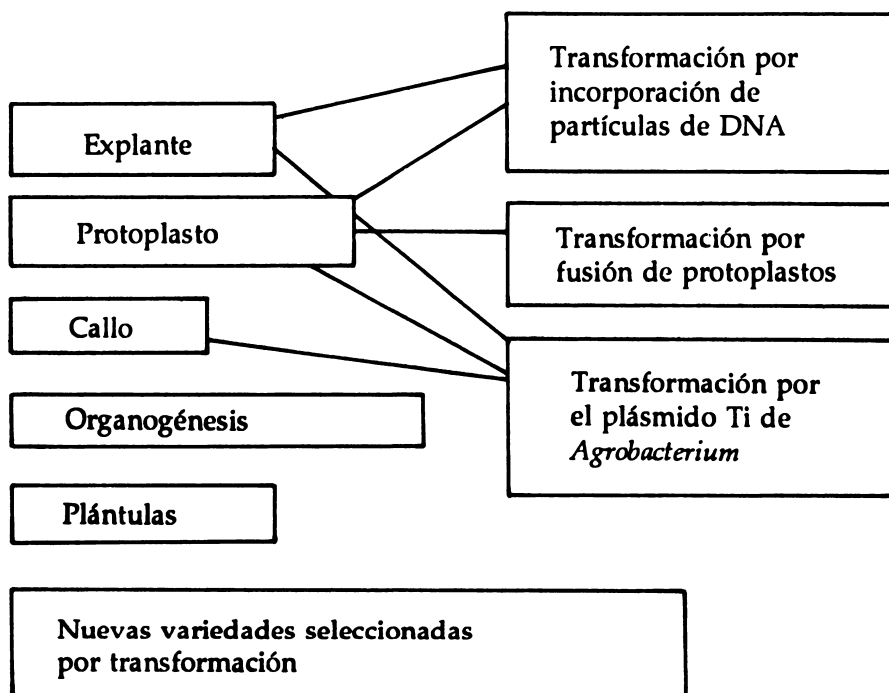


Fig. 1B. Métodos de transformación en el cultivo de tejidos.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

Con el fin de estimular una perspectiva de la incidencia del cultivo de tejidos vegetales en el desarrollo de la biotecnología agrícola, en este documento se revisan los siguientes tópicos:

- Técnicas de regeneración –organogénesis– directa o vía tejidos desdiferenciado –callo–, multiplicación de yemas axilares, embriogénesis somática directa o vía callo, regeneración a partir de protoplastos y cultivo de anteras y granos de polen.

- Variación somaclonal como una alternativa para la selección de nuevas variedades vegetales.
- Micropropagación de especies vegetales por medio de la multiplicación de yemas axilares y la formación de embriones somáticos.
- Cultivo de raíces.

Regeneración

Por regeneración se entiende el proceso por el cual se obtiene una planta adulta en medios de cultivos artificiales a partir de una célula, un fragmento de tejido o un órgano específico (explante). La regeneración vegetal es un proceso central en el desarrollo de la biotecnología agrícola, ya que los procesos de transformación, micropropagación, variación somaclonal y selección de líneas haploides culminan en la regeneración de la planta adulta.

A continuación se describe, de manera general, la secuencia de pasos que se siguen para lograr la regeneración vegetal. Posteriormente se analizarán las particularidades de los diferentes métodos existentes.

Explante

Como se mencionó anteriormente, el proceso de regeneración se inicia con la selección de un explante, el cual puede ser una célula aislada, un fragmento de tejido o un órgano en particular (polen, anteras y otros). La selección del explante depende de los objetivos finales que se persigan; por ejemplo, en el proceso de micropropagación, la mayoría de las técnicas emplean tejido meristemático del ápice de la planta.

En general, los tejidos inmaduros son especialmente apropiados para la regeneración, dada su mayor plasticidad morfogenética. Las particularidades de los explantes se tratarán con mayor detalle cuando se describan cada una de las técnicas de regeneración.

El explante seleccionado es esterilizado por métodos químicos con la finalidad de eliminar los contaminantes (bacterias y hongos). Tal proceso es fundamental, ya que los medios empleados en estas áreas poseen un alto contenido de nutrimentos, lo que favorece el crecimiento de este tipo de microorganismos, altamente nocivos para la planta.

El explante, una vez esterilizado, es colocado en medios de cultivo adecuados para la formación del tallo —organogénesis directa— o para generar un callo —tejido desdiferenciado— y, de esta forma, constituir un tallo

—organogénesis vía callo— (Fig 2B). La consecución de una u otra forma de organogénesis depende del balance hormonal del medio. Un nivel alto de auxinas favorece la formación del callo, mientras que la baja concentración de auxinas y alta de citocininas promueve el desarrollo del tallo a partir del callo.

El siguiente paso, una vez obtenido el tallo, es el enraizamiento, el cual se logra desplazando el tejido a un medio con un balance hormonal diferente. Normalmente, la formación de la raíz se favorece al aumentar la relación auxinas/citocininas, aunque en algunas especies la formación de raíces se obtiene en medios carentes de hormonas, dado el contenido endógeno de auxinas.

A las plantas así formadas se les denomina plántulas, las cuales son transplantadas a macetas en condiciones controladas de temperatura y humedad, protegiéndolas asimismo de agentes patógenos, hasta consolidar su crecimiento (adaptación) para trasplantarlas luego a las áreas de cultivo destinadas a la formación del fruto y la obtención de la semilla.

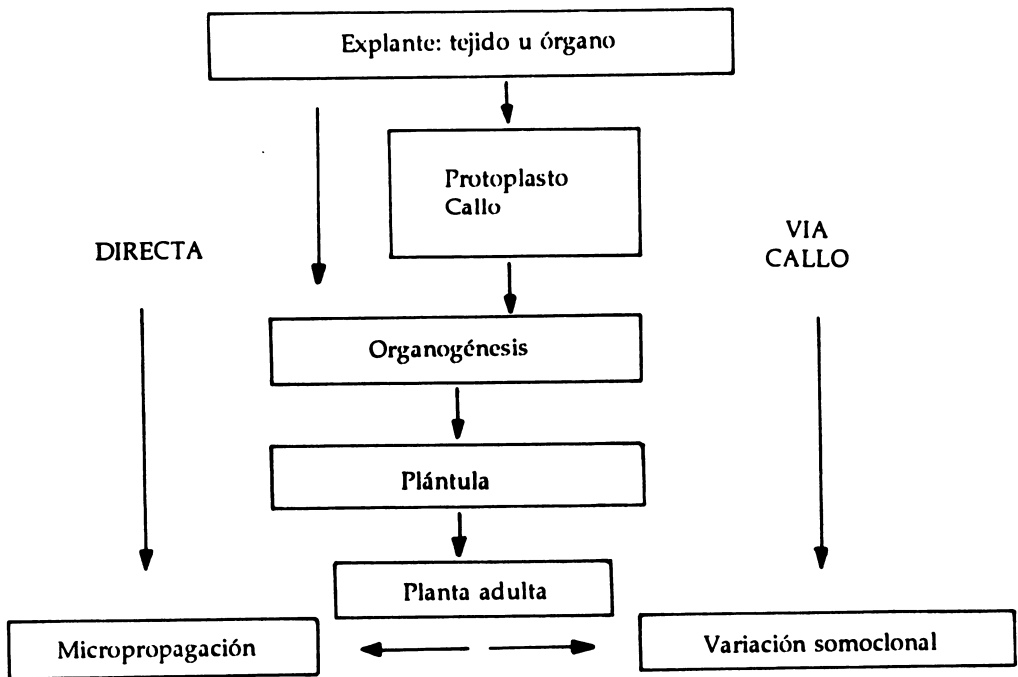


Fig. 2B. Regeneración directa y vía callo.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

A continuación se describen las diferentes técnicas de regeneración y su aplicación:

Regeneración directa

Este método de regeneración vegetal es particularmente apropiado para las especies herbáceas. La técnica de organogénesis directa comprende el aislamiento y esterilización del explante. En general, para esta técnica, se emplean tejidos jóvenes que pueden ser fragmentos de hoja, tallo, raíz, bulbos y tubérculos.

El punto fundamental radica en establecer el explante en un medio con concentraciones moderadas de auxinas y citocininas para lograr el desarrollo directo del tallo, evitando la formación del callo (Fig. 3B). La multiplicación se logra subdividiendo los tallos formados y plantándolos por separado, ya que de cada explante se desarrolla más de un tallo.

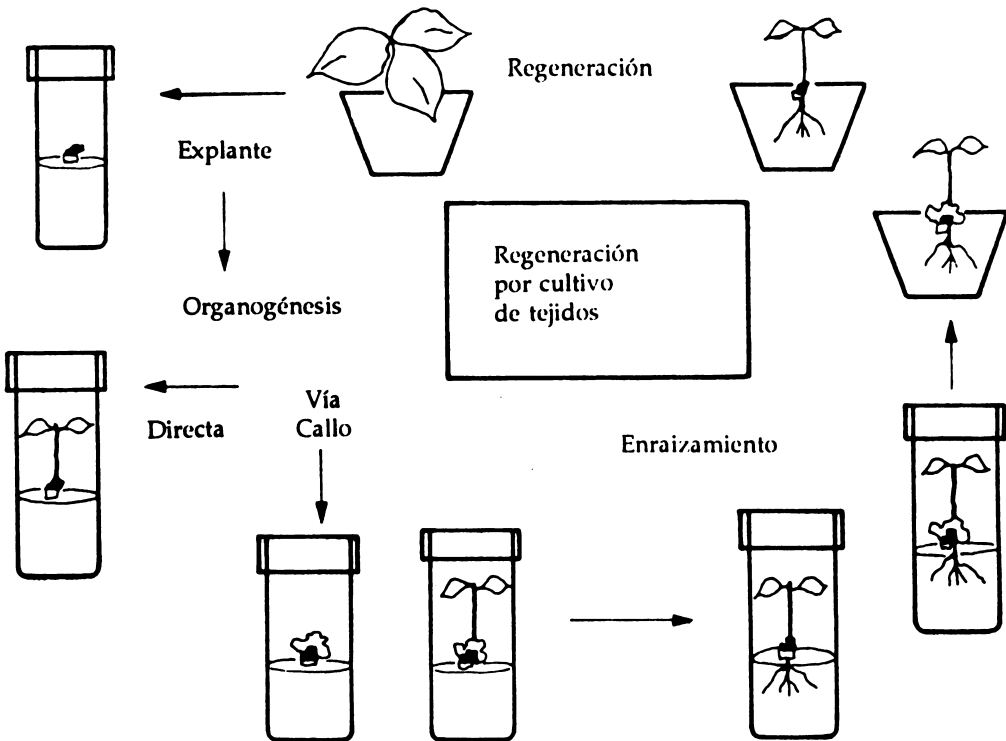


Fig. 3B. Regeneración por cultivo de tejidos.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

En general, esta técnica puede ser empleada para realizar estudios de morfogénesis y para micropropagar algunas especies. Cabe señalar que, dependiendo de la planta empleada, la micropropagación por este método puede o no ser exitosa, ya que en algunas especies se presentan variaciones genéticas que pueden afectar ciertas características agrícolas importantes del cultivo.

Regeneración vía callo

Una gran variedad de explantes se han empleado para la producción de callos, los cuales consisten en un cúmulo de células de gran heterogeneidad. Dentro de este tejido, se desarrollan células con una alta actividad meristemática, a partir de las que se logra el desarrollo del tallo. Esto significa que sólo un porcentaje bajo del total de células que forman el callo son capaces de regenerar una planta.

Por medio de esta técnica, a diferencia de las anteriormente descritas, el explante —después de ser esterilizado— se transfiere a un medio con una alta relación de auxinas/citokininas, lo que favorece la desdiferenciación del tejido y la formación del callo.

Cuadro B1. Plantas regeneradas por organogénesis.

Planta	Método	Explante
Abedul (<i>Befula pendula</i>)	VC	Flor
Abeto (<i>Picea abies</i>)	VC, D	Hipocótilos
Acacia (<i>Acacia</i> spp.)	VC	Raíz
Agave (<i>Agave</i> spp.)	VC	Semilla
Ajo (<i>Allium sativum</i>)	VC	Tallo, bulbo y hoja
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	D	Hipocótilo
Almendra (<i>Prunus amygdalus</i>)	VC	Hoja, cotiledón y embrión
Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	VC	Raíz, hoja y embrión maduro
Avena (<i>Avena sativa</i>)	VC	Hipocótilos
Batai (<i>Albizia lebeck</i>)	D	Hipocótilos
Begonias (<i>Begonia hiemalis</i>)	D	Pecíolo y hoja
Brocolí (<i>Brassica oleracea</i>)	VC, D	Hoja y tallo
Cacahuete (<i>Arachis hipogaea</i>)	VC	Embrión inmaduro
Cactus (<i>Opuntia wodsii</i>)	D	Tallo
Caña de azúcar (<i>Saccharum utilissima</i>)	VC	Hoja

Cuadro B1. (Cont.)

Planta	Método	Explante
Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	VC	Meristemo apical y embrión maduro
Cebolla (<i>Allium cepa</i>)	VC	Bulbo
Coliflor (<i>B. oleracea</i>)	VC	Hoja
Col (<i>Brassica oleracea</i>)	VC	Tallo
Chicharo (<i>Pisum sativum</i>)	VC	Epicótilos
Digitalis (<i>Digitalis purpurea</i>)	VC	Semilla
Frijol (<i>Pisum vulgaris</i>)	VC	Hoja
Geranio (<i>Pelargonium</i>)	VC	Tallo, pecíolo y raíz
Limón (<i>Citrus limnetoides</i>)	VC	Tallo
Lino (<i>Linum usitatissimum</i>)	VC	Hipocotiledón
Maíz (<i>Zea mays</i>)	VC	Mesocotiledones
Manzana (<i>Malus pumila</i>)	VC	Cotiledones
Nabo (<i>Brassica napus</i>)	VC	Hoja
Papa (<i>Solanum tuberosum</i>)	VC	Tubérculo
Petunia (<i>Petunia hybrida</i> , <i>P. pendula</i> y <i>P. parodi</i>)	VC	Hoja y raíz
Pimiento (<i>Capsicum annum</i>)	VC	Cotiledón y hipocotiledón
Pino (<i>Pinus radiata</i> , <i>P. strobus</i> <i>P. sylvestria</i> y <i>P. pinaster</i>)	VC, D	Cotiledón y embrión
Piña (<i>Ananas comosus</i>)	VC, D	Gemas axilares y hojas
Puerro (<i>Allium porrum</i>)	D	Hoja
Rábano (<i>Armoracia laphatifolia</i>)	VC	Hoja
Remolacha (<i>Beta vulgaris</i>)	VC	Hoja
Rosa (<i>Rosa hybrida</i>)	D	Meristemo de tallo
Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)	VC	Plántula
Tiquisque (<i>Xanthosoma xanthocarpum</i>)	VC	Tallo
Tomate (<i>Lycopersicum esculentum</i>)	VC	Hoja, tallo, hipocotiledón y cotiledón
<i>L. peruvianum</i>	VC	Raíz y hoja
Trébol blanco (<i>Trifolium repens</i>)	VC	Hipocótilos, cotiledón, meristemo y semilla
Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	VC	Embrión y semilla
Tuya (<i>Thuja plicata</i> y <i>T. occidentalis</i>)	D	Cotiledón, tallo tejido juvenil
Zanahoria (<i>Daucus carota</i>)	VC, D	Raíz, hoja, tallo
Zarzamora (<i>Rubus</i>)	D	Meristemo apical

C: Organogénesis vía callo; D: Organogénesis directa

Fuente: Elaboración del autor 1989.

Una vez desarrollado el callo, éste se resiembra en el mismo tipo de medio para lograr su proliferación. El inicio de la formación del tallo —organogénesis— se logra generalmente invirtiendo la relación auxina/citokinina (Fig. 3B). Para especies herbáceas, los explantes más usados son tallos, peciolos, hojas y pétalos de flor. Para especies perennes se requieren órganos mitóticamente activos, como son la punta de los tallos o sus regiones meristemáticas. Esta técnica puede ser empleada para estudios básicos de organogénesis; por otro lado, constituye la base para la selección de nuevas variedades, por medio de la llamada técnica de variación somaclonal, que se describirá más adelante.

Multiplicación de yemas axilares

Las técnicas de cultivo de tejidos vegetales de mayor repercusión económica, hasta el momento, consisten en la multiplicación de yemas auxiliares a partir de meristemas apicales (Fig. 4B). Todas las plantas crecen a partir de su meristemo apical.

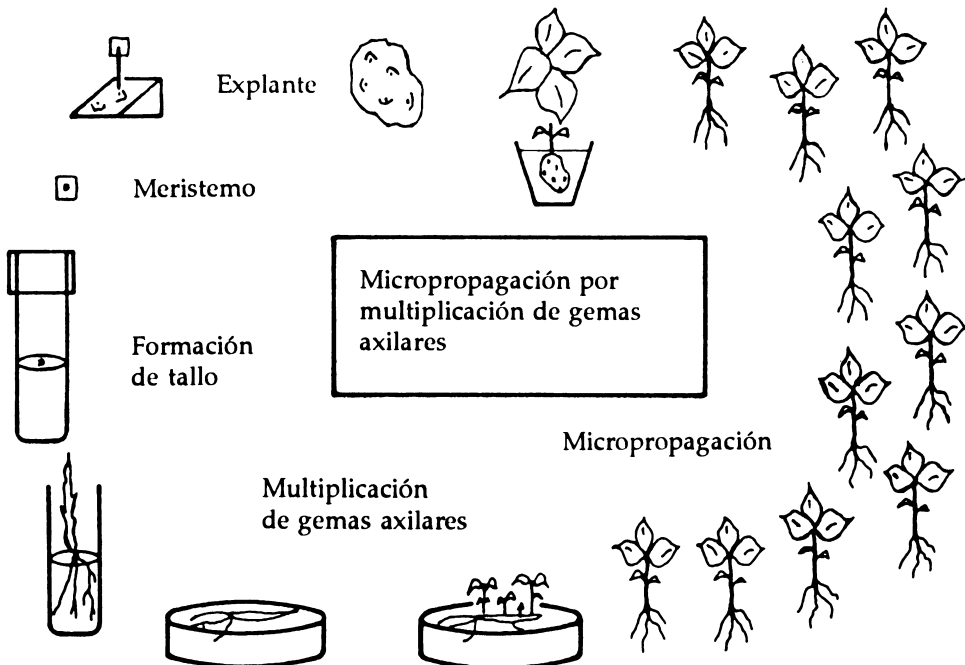


Fig. 4B. Micropropagación por multiplicación de gemas axilares.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

El meristemo apical se localiza en la punta del tallo y es un tejido con una tasa de división muy alta. Las células del meristemo apical y regiones adyacentes presentan una alta totipotencialidad, lo que ha permitido micropropagar un gran número de especies vegetales para su comercialización. A partir del cultivo de meristemos, se pueden regenerar plantas adultas, induciendo la ramificación por activación de las yemas axilares.

Una de las particularidades importantes de este método reside en que, dependiendo del tamaño original del explante, se pueden obtener plantas libres de patógenos, particularmente virus.

El proceso consiste en el aislamiento y esterilización del explante que en este caso es el meristemo apical. Se pueden emplear también segmentos internodales del tallo. El explante se coloca en un medio con bajos niveles de hormonas, lo que permite el desarrollo de las yemas auxiliares y evita la formación del callo.

En general, se emplean citokininas para abatir la dominancia apical y promover el desarrollo de las yemas laterales aisladas de la base de la hoja. Este proceso resulta en la formación de tallos, de donde se aíslan los meristemos apicales y se cultivan en un medio sin hormonas.

Los meristemos se desarrollan en tallos que son transplantados horizontalmente en un medio con altos niveles de auxinas, lo que permite la formación de tallos axilares. El subcultivo de estos tallos en un medio con altas concentraciones de auxinas, es lo que permite la multiplicación en forma exponencial de los tallos.

Algunos de los tallos generados por este mecanismo son utilizados como donadores de meristemos, lo que permite mantener de manera indefinida la producción de plantas. Por lo común, los tallos así formados desarrollan raíces, sin necesidad de modificar el medio de cultivo, por lo que se procede a separar cada plántula, las cuales son adaptadas y trasplantadas a macetas para su maduración (Fig. 4B).

Embriogénesis somática directa o vía callo

La formación de embriones somáticos se puede llevar a cabo directa o indirectamente (Fig 5B). La primera implica la formación asexual de un embrión a partir de una sola célula o grupo de células del explante, sin la formación del callo –embriogénesis somática directa.

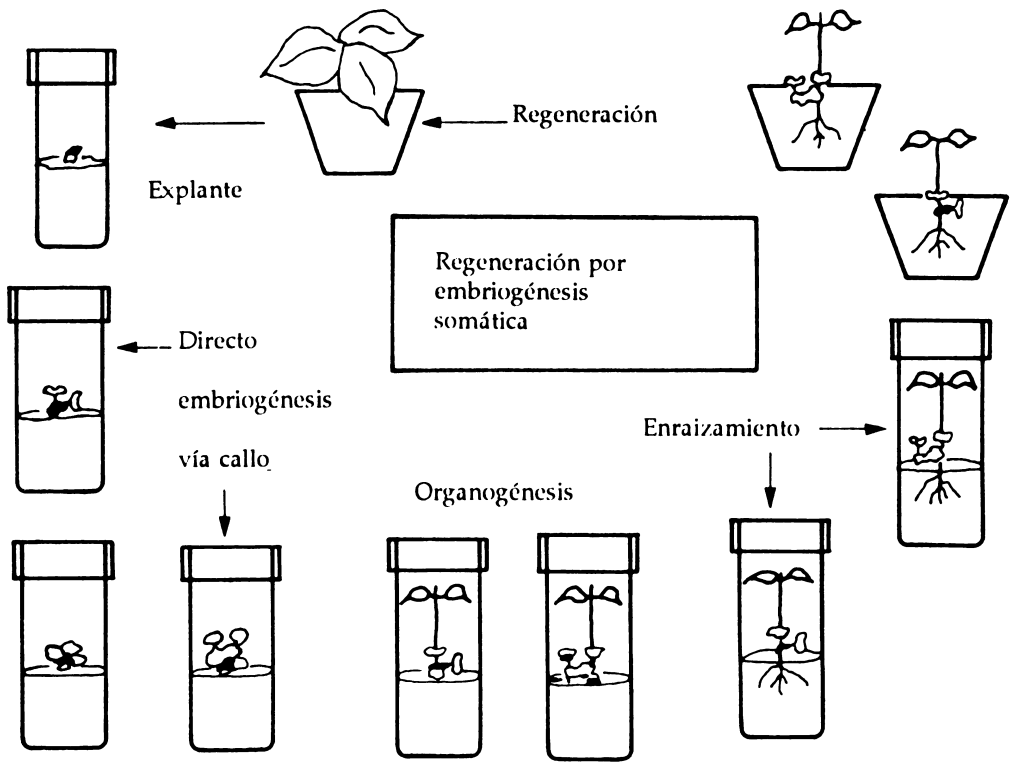


Fig. 5B. Regeneración por embriogénesis somática.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

Esta técnica ha sido empleada con gran éxito en plantas de la familia de las rutáceas, que incluyen básicamente los cítricos. Los explantes que se usan pertenecen a la parte del óvulo llamada "nucela", que tiene una gran capacidad para desarrollar embriones sin necesidad de añadir hormonas vegetales al medio.

El número de embriones que se forman depende de la variedad de la cual se parte, ya que existen nucelas poliembriónicas y monoembriónicas. Esta técnica, como se mencionó anteriormente, ha permitido la micropropagación de cítricos; sin embargo, no existen métodos claros y reproducibles para otros tipos de planta, por lo que resulta necesario un mayor estudio de este fenómeno para lograr resultados reproducibles en otras especies.

Cuadro B2. Plantas regeneradas por embriogénesis.

Planta	Explante
Ajo (<i>A. sativum</i>)	Tallo
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	Meristemo apical
Algodón (<i>Gossypium klotzschianum</i>)	Hipocotiledón
Amapola (<i>Papaver somniferum</i>)	Hipocotiledón
Anís (<i>Pimpinella anisum</i>)	Hipocotiledón
Apio (<i>Apium graveolens</i>)	Pecíolo
Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	Hoja inmadura
Avellana (<i>Corylus avellana</i>)	Embrión
Batai (<i>A. lebeck</i>)	Hipocotiledón
Belladona (<i>Atropa belladonna</i>)	Raíz
Berenjena (<i>Solanum melongena</i>)	Hipocotiledón
Cacao (<i>Theobroma cacao</i>)	Embrión inmaduro
Café (<i>Coffea arabica</i>)	Hoja y tallo
Cilandro (<i>Coriandrum sativum</i>)	Embrión y pecíolo
Coliflor (<i>B. oleracea</i>)	Hoja
Dátil (<i>Phoenix dactylifera</i>)	Ovulo y gemas axilares
Eneldo (<i>Anethum graveolens</i>)	Embrión
Espárrago (<i>Asparagus officinalis</i>)	Brotes
Maíz (<i>Z. mays</i>)	Embrión inmaduro
Naranja (<i>Citrus sinensis</i>)	Ovulo
Palma de aceite (<i>Elaeis guineensis</i>)	Embrión
Papaya (<i>Carica papaya</i>)	Pecíolo y óvulo
Perejil (<i>Petroselinum hortense</i>)	Pecíolo
Petunia (<i>P. hybrida</i>)	Tallo y hoja
Sándalo (<i>Santalum album</i>)	Tallo
Sorgo (<i>S. bicolor</i>)	Embrión maduro e inmaduro
Tabaco (<i>Nicotiana tabacum</i>)	Hoja
Tomate (<i>L. peruvianum</i>)	Hoja
Trébol (<i>T. pratense</i>)	Semilla
Trigo (<i>T. aestivum</i>)	Embrión inmaduro
Uva (<i>Vitis vinifera</i>)	Flor, hoja y óvulo
Zanahoria (<i>D. carota</i>)	Raíz

Fuente: Elaboración del autor 1989.

La embriogénesis indirecta consiste en establecer un explante en un medio de cultivo con una alta concentración de auxinas, para promover la formación del callo e iniciar la formación de proembrios. Los callos formados son transferidos a un medio carente o con bajos niveles de hormonas, lo que facilita

el desarrollo de los proembrios a embriones bipolares, los cuales en condiciones favorables pueden germinar y formar una planta.

Cuando los callos son transferidos a un medio con niveles bajos de hormonas, se promueve la formación de más proembrios y su desarrollo en embriones bipolares, lo que permite multiplicar el número de plantas regeneradas. Esta técnica ha sido muy empleada para la propagación de plantas de la familia Umbelliferae, especialmente en cultivos de zanahoria. Actualmente se sabe que el desarrollo del embrión somático es un fenómeno general y se puede lograr prácticamente en cualquier planta de cualquier familia.

Existe, sin embargo, una serie de problemas en el cultivo del embrión somático que requieren ser resueltos para que esta técnica pueda ser empleada comercialmente en un mayor número de plantas. Por otro lado, la estabilidad genética de las plantas regeneradas por tal método es todavía cuestionable.

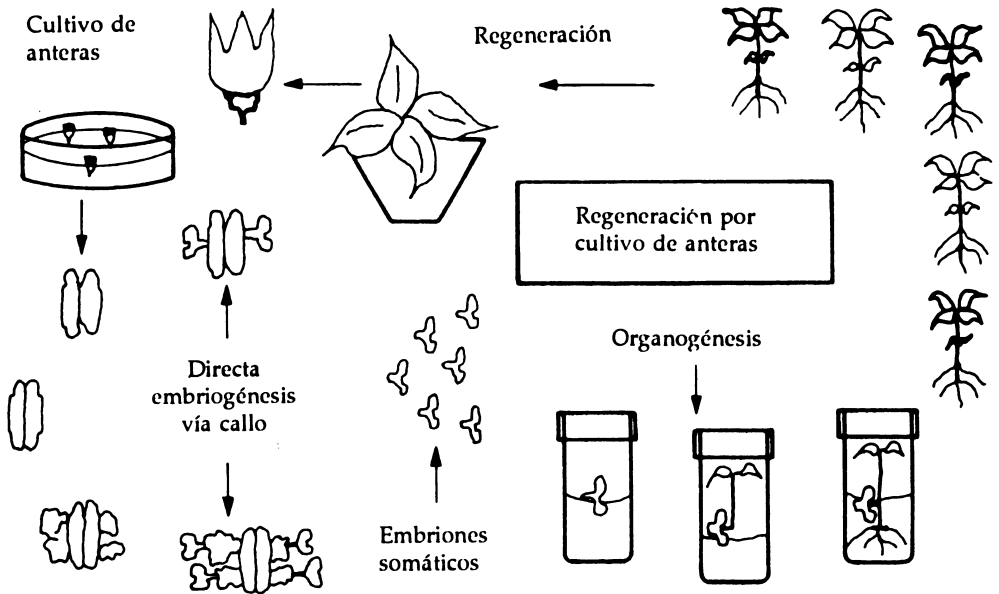


Fig. 6B. Regeneración por cultivo de anteras.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

Cultivo de anteras y granos de polen

En esta técnica, el procedimiento se basa fundamentalmente en el aislamiento y esterilización de las anteras, así como en su incubación con medios artificiales que permitan la formación de embriones a partir de los granos de polen contenidos en ella.

Los embriones derivados del grano de polen son sometidos a diferentes medios con bajo contenido de hormonas para el desarrollo de plantas (Fig. 6B). El cultivo de anteras para la formación de embriones requiere un control muy estricto de humedad, temperatura, intensidad luminosa y duración del fotoperíodo al que se somete el tejido.

Todos estos factores afectan de manera importante la formación del embrión. Por otro lado, se ha visto que la exposición a bajas temperaturas de la antera, aumenta la producción de plántulas. En relación con el contenido de hormonas de los medios, en general, se pueden distinguir dos especies: aquellas que requieren de adición de hormonas (gramíneas y crucíferas) y las que son independientes de hormonas (solanáceas). Una característica importante de este método es que las plantas derivadas de él son plantas haploides, lo que les confiere ventajas de gran importancia, porque:

- Constituyen un material que permite identificar directamente los caracteres recesivos;
- no producen poliploidias en experimentos de hibridación somática (fusión de protoplastos);
- permiten la producción de líneas homocigóticas con una gran homogeneidad de la progenie;
- reducen de manera significativa el tiempo de producción de líneas homocigóticas; y
- logran una selección directa de los caracteres genéticos individuales.

Regeneración a partir de protoplastos

El procedimiento de regeneración, a partir de protoplastos, implica la esterilización del explante y el tratamiento con enzimas celulolíticas que degradan la pared celular y dejan la célula con la membrana plasmática íntegra. Los tipos y combinaciones de enzimas dependen del tipo de explante y de la especie con la que se está trabajando.

Los protoplastos formados son lavados para eliminar las enzimas empleadas y, posteriormente, son cultivados artificialmente para iniciar la división celular y la formación del callo. Después, los callos son trasplantados para inducir la organogénesis –formación de tallos o embriones– (Fig. 7B).

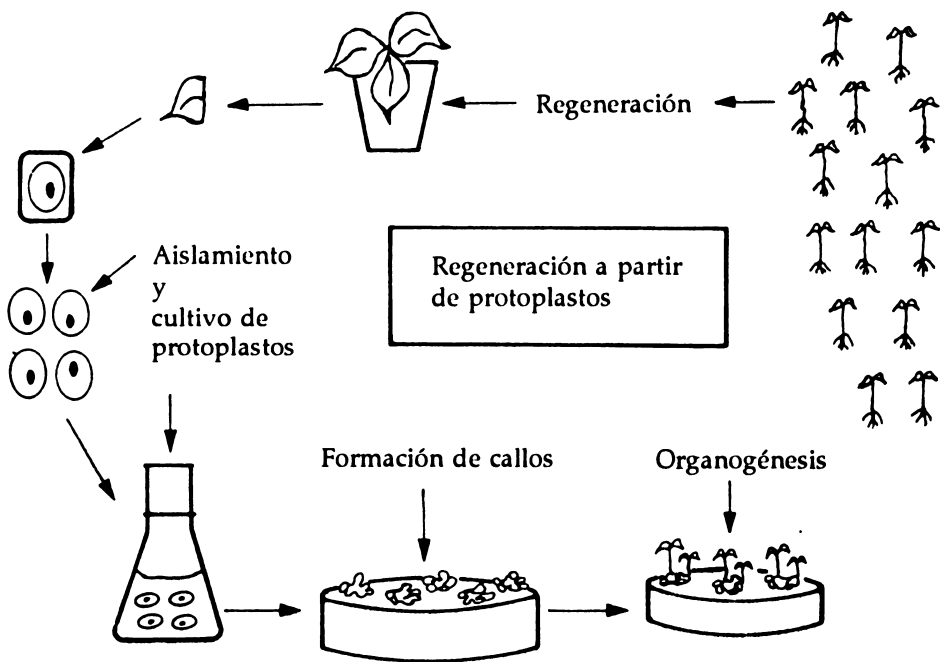


Fig. 7B. Regeneración a partir de protoplastos.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

Cabe señalar que la regeneración a partir de protoplastos está condicionada por la capacidad de división que las células mantengan después del tratamiento con las enzimas. Esta capacidad depende de las especies empleadas.

Publicaciones recientes indican que ella parece tener relación con el medio, y que se mantengan las condiciones necesarias para una reestructuración ordenada de la pared celular.

Recuadro B1. Plantas regeneradas a partir de protoplastos.

Alfalfa (<i>M. sativa</i>)	Papa (<i>S. tuberosum</i>)
Arabidopsis (<i>A. thaliana</i>)	Petunia (<i>P. hybrida</i>)
Belladona (<i>A. belladonna</i>)	Pimiento (<i>C. annum</i>)
Berenjena (<i>S. melongena</i>)	Tabaco (<i>N. tabacum</i>)
Digitalis (<i>D. purpurea</i>)	Tomate (<i>L. peruvianum</i>)
Espárrago (<i>A. officinalis</i>)	Trébol (<i>T. repens</i>)
Geranio (<i>Pelargonium spp.</i>)	Yuca (<i>Manihot esculenta</i>)
Nabo (<i>B. napus</i>)	Zanahoria (<i>D. carota</i>)
Naranja (<i>C. sinensis</i>)	

Fuente: Elaboración del autor 1989.

La técnica de regeneración, a partir de protoplastos, así como las demás técnicas de regeneración que involucran la formación de callos, son la base para la producción de nuevas variedades vegetales, lo que se conoce como "variación somaclonal". A continuación se describe el significado de estos métodos y su aplicación.

Variación somaclonal y micropropagación

La variación somaclonal es, en la actualidad, una alternativa viable para la selección de nuevas variedades con características agrícolas ventajosas, ante los avances en las técnicas de cultivo vegetal.

La técnica de variación somaclonal consiste en formar, a partir de una célula o un pedazo de tejido vegetal, un callo y/o embriones somáticos, a través de los cuales se pueda inducir el desarrollo de una planta adulta. La alta tasa de división celular de estos callos genera cambios genéticos, los cuales confieren a las plantas regeneradas características diferentes de la planta original. De esta manera se pueden seleccionar nuevas variedades con mejores características agrícolas.

Cuadro B3. Plantas que se han micropropagado.

Plántulas	Explantes
Abedul	Gemas axilares y embrión
Ajo	Meristemos apicales y gemas axilares
Alcachofa	Meristemo apical y gemas axilares
Almendro	Gemas axilares
Araucaria	Gemas axilares
Cacahuat	Meristemos apicales
Café	Meristemo apical
Cerezo	Meristemos apicales
Ciruela	Gemas axilares
Cítricos	Gemas axilares
Clavel	Meristemo apical y gemas axilares
Col	Gemas axilares
Coliflor	Meristemos
Crisantemos	Meristemos apicales
Chícharo	Meristemos de plántulas
Durazno	Meristemo apical
Espinaca	Meristemo apical de plántulas
Eucalipto	Multiplicación de tallos y gemas
Frambuesa	Meristemos apicales
Fresa	Meristemo apical
Frijol	Meristemo apical
Garbanzo	Meristemos apicales
Gerbera	Meristemo apical
Gladiolas	Gemas axilares
Laurel	Meristemos apicales de plántulas
Lechuga	Meristemo apical y gemas axilares
Maíz	Meristemo apical
Manzana	Meristemo apical
Orquídeas	Gemas axilares
Papa	Meristemo apical de plántulas
Papaya	Meristemo apical
Pera	Meristemo apical
Plátano	Gemas axilares
Remolacha	Gemas axilares
Rosa	Meristemo apical
Sándalo	Meristemo apical y gemas axilares
Sandía	Meristemos de plántulas
Sauce	Gemas axilares
Soja	Gemas axilares
Tomate	Meristemo apical
Yuca	Meristemo apical
Zarzamora	Meristemos de plántulas

Fuente: Elaboración del autor 1989.

La técnica de micropropagación permite a partir de un fragmento de tejido o de un órgano de planta ya seleccionada, generar un sinnúmero de plantas, conservando las características de la planta original. En general, la técnica de multiplicación de yemas axilares a partir de meristemos apicales es la más empleada en micropropagación, ya que se ha observado una mayor homogeneidad de las plantas producidas y una mejor conservación de los caracteres maternos, además de la liberación de patógenos del tejido.

La multiplicación se logra por la técnica de organogénesis directa, obteniéndose un gran número de plantas sin necesidad de esperar la formación de semillas, lo que permite un ahorro de tiempo considerable. En este punto, los estudios realizados indican que la técnica de micropropagación permite liberar nuevas variedades en aproximadamente un cincuenta por ciento del tiempo requerido por las técnicas tradicionales de fitomejoramiento.

Cultivo de raíces

El cultivo de raíces *in vitro* se basa en la capacidad de *A. rhizogenes* de incorporar en el genoma de la planta un fragmento del plásmido Ri (*root inducing*), el cual regula el balance hormonal endógeno de la célula infectada. Ello induce la formación de raíces adventicias de rápido crecimiento en el sitio de penetración de la bacteria.

Estas raíces o radículas pueden ser cultivadas de manera aséptica, aplicando antibióticos como carbenicilina, con el fin de reducir el número de bacterias. Una de las principales ventajas de estas radículas es su gran estabilidad fenotípica y su alta velocidad de crecimiento (Pirt 1987), (Fig. 8B).

Uno de los campos con mayores y mejores perspectivas en el cultivo de raíces es el de la producción de metabolitos secundarios de plantas. La razón de esto es que, en células desdiferenciadas, no se logra una inducción de las vías de síntesis de metabolitos secundarios (Staba 1980). En plantas de *Datura*, la producción de metabolitos secundarios mantiene una relación inversa con la velocidad de crecimiento del cultivo de callos (Lindsey y Yeoman 1983). También se ha observado que la producción de metabolitos secundarios se incrementa cuando el tejido desdiferenciado es inducido a la organogénesis.

En callos de *Atropa belladonna* no se produce el alcaloide hyoscinamina; sin embargo, cuando se logra la formación de raíces en estos callos se inicia la formación del alcaloide (Raj Bhandary *et al.* 1969). De manera similar se ha visto que los glicósidos digitales en *Digitalis* se producen cuando se induce con hormonas vegetales la formación de embriones somáticos a partir de callos (Hubertty *et al.* 1984).

Cuadro B4. Plantas en las que se han obtenido tejidos, embriones y/o plantas haploides por cultivo de anteras.

Planta	Tejidos obtenidos
Algodón	Callo y embrión
Almendro	Callo
<i>Arabidopsis</i>	Callo y planta
Arroz	Callo, embrión y planta
Belladona	Callo, embrión y planta
Berenjena	Callo y planta
Cacahuate	Callo, embrión y planta
Café	Callo y embrión
Caña de azúcar	Callo y planta
Cebada	Callo, embrión y planta
Cerezo	Callo y embrión
Col	Callo, embrión y planta
Coliflor	Callo y planta
Col china	Callo y planta
Crisantemo	Callo
Digitalis	Callo y planta
Durazno	Callo
Espárrago	Callo, embrión y planta
Fresa	Callo
Garbanzo	Callo y embrión
Gadíolas	Callo
Haba	Callo
Limón	Callo y embrión
Maíz	Callo y planta
Manzana	Callo
Olmo	Callo
Petunia	Callo y planta
Pimiento	Callo
Remolacha	Callo
Soja	Callo
Tabaco	Callo, embrión y planta
Tomate	Callo, embrión y planta
Trébol	Callo y planta
Trigo	Callo y planta
Uva	Callo y planta

Fuente: Elaboración del autor 1989.

Existen actualmente diversos reportes de la producción de metabolitos secundarios en cultivos de raíces (Pirt 1987; Parr 1989), lo que genera expectativas cada vez más alentadoras para la producción de compuestos de interés industrial, por medio de la metodología.

Avances recientes en el cultivo de tejidos

A continuación se describen algunos de los avances más recientes en el cultivo de tejidos con diferentes grupos de plantas.

Arroz

El arroz es uno de los cereales con mayores avances en el cultivo de tejidos. Existen reportadas técnicas de micropropagación por organogénesis y embriogénesis, así como de regeneración de plantas a partir de protoplastos.

Se tienen ya reportadas variedades haploides seleccionadas por cultivo de anteras y variedades resistentes a patógenos, metales pesados y salinidad, como a variedades de mayor calidad proteica. Cabe mencionar tales operaciones:

- Selección de líneas de grano grande y resistente a bajas temperaturas o cultivo de anteras;
- aislamiento de variedades con mayor contenido de lisina y de proteínas de almacenamiento en semilla (Schaeffer y Sharpe 1987);
- selección de variedades machos estériles con ventajas agronómicas (Lin *et al.* 1987);
- descripción de métodos con alta eficiencia de regeneración, vía formación de embriones somáticos a partir de protoplastos (Abdullan, Cocking y Thompson 1986).

Maíz

Este cultivo ha sido uno de los más difíciles de cultivar *in vitro*; sin embargo, en la actualidad, se poseen reportes de la producción de líneas haploides por medio del cultivo de anteras y la formación de embriones somáticos. Por otro lado, existen también reportes de regeneración de plantas a partir de protoplastos como:

- El empleo de agentes mutagénicos –tanto físicos como químicos– para incrementar la variación genética en el cultivo de tejidos. De esta manera se han seleccionado variedades con mayor vigor, resistentes a bajas temperaturas y a herbicidas;
- la radiación del tejido con rayos X que favorece la formación de embriones somáticos.

Trigo

El trigo, al igual que el arroz, es un cereal cuyo manejo *in vitro* se ha desarrollado satisfactoriamente. Sus perspectivas en cuanto a la obtención de variedades mejoradas son muy promisorias:

- Se han seleccionado plantas resistentes al calor y a la desecación, utilizando benciladenina como agente inductor;
- existen estudios sobre la frecuencia de variación somaclonal en poblaciones de trigo, generadas por cultivo de tejidos (Chen *et al.* 1987);
- se han aislado variedades tolerantes a la congelación por variación somaclonal.

Cebada

Los avances en el cultivo de tejidos en cebada han sido lentos principalmente porque los métodos son poco eficientes y reproducibles. Sin embargo existen algunos reportes interesantes:

- Obtención de variedades resistentes a *Helminthosporium* por variación somaclonal (Chawla y Wenzel 1987);
- obtención de variedades resistentes al ácido fusárico.

Sorgo

Poco se ha avanzado en el cultivo de tejido de sorgo; sin embargo se han dado a conocer algunas líneas capaces de formar callos y regenerar plantas:

- En sorgo, se reportó recientemente la obtención de líneas tolerantes a insectos, las cuales fueron seleccionadas por su tolerancia a la sal. Este caso es uno de los recientes y refleja lo que se ha dado en llamar "tolerancia cruzada a estrés".

Caña de azúcar

Dentro de los cereales, la caña de azúcar junto con el arroz han sido de los cultivos que se han transplantados al campo de manera exitosa. Ello implica que las técnicas de regeneración —organogénesis y/o embriogénesis— y la variación somaclonal se han podido establecer con éxito.

Tabaco

Esta planta constituye uno de los sistemas-modelo, donde las técnicas de cultivo de tejidos se encuentran altamente desarrolladas desde la regeneración a partir de protoplastos, la organogénesis directa o vía callo hasta la formación de embriones somáticos:

- Actualmente la compañía Calgene desarrolla pruebas de campo en plantas resistentes a herbicidas (bromoxinil y glifosato), seleccionadas por ingeniería genética;
- se han logrado variedades resistentes a patógenos, seleccionadas por cultivo de tejidos (Tuzum y Kuc 1987);
- la compañía Agrigenetics está probando nuevas líneas aisladas por ingeniería genética, resistentes al virus del mosaico de la alfalfa;
- se han logrado plantas resistentes a *heat shock* y a exposiciones prolongadas a bajas temperaturas. Estas plantas se seleccionaron por su resistencia al cadmio (Cd), lo que representa otro caso de la ya mencionada tolerancia cruzada al estrés (Huang y Goldsbrough 1988);
- se informa acerca de los aspectos bioquímicos de la tolerancia cruzada al estrés en tabaco (Harrington y Alm 1988).

Tomate

Al igual que en el tabaco, el tomate constituye uno de los sistemas-modelo, donde se han aplicado con mayor éxito las técnicas de cultivo de tejidos para buscar variedades mejoradas. Actualmente se han reportado variedades de alto contenido de sólidos en el fruto, resistencias a Cd y carentes de pedículo, lo que permite un manejo mecánico del cultivo y variedades resistentes a patógenos:

- Por cultivo de tejidos, se han seleccionado variedades resistentes al Cd (Huang, Hatch y Goldbrough 1987);

- la compañía Monsanto tiene en pruebas de campo nuevas líneas de tomate, resistentes al virus del Mosaico del Tabaco, seleccionadas por ingeniería genética. También la compañía DuPont está probando en el campo variedades resistentes al herbicida sulfonilurea. De igual manera, la compañía Agrigenetics ha puesto a prueba nuevas líneas de tomate resistentes a insectos.

Papa

La papa es otra de las plantas donde las técnicas de regeneración a partir de protoplastos, organogénesis y embriogénesis —tanto para la selección de nuevas variedades como para micropropagación— han sido empleadas exitosamente. Actualmente, existe un sinnúmero de reportes sobre los aspectos biotecnológicos del cultivo *in vitro* de la papa. Para resumir, se enumeran los logros obtenidos en los últimos años en esta planta, a través del cultivo de tejidos y por los métodos de ingeniería genética:

- Líneas libres de virus por micropropagación, a partir de meristemos apicales;
- formación de microtubérculos *in vitro* y micropropagación a partir de éstos;
- liberación temprana de líneas haploides;
- nuevas variedades por variación somaclonal;
- selección de híbridos somáticos;
- nematodos, herbicidas, congelamiento, desecación y suelos adversos; y
- variedades de alta calidad nutricia.

Frutales

La aplicación de cultivos de tejidos en árboles frutales ha sido encaminada principalmente al desarrollo de los métodos de organogénesis y embriogénesis, con el fin de lograr su micropropagación. Sin embargo, por su ploidia, las poblaciones obtenidas presentan una gran heterogeneidad, por lo que se han desarrollado de manera particular las técnicas de cultivo de anteras para la obtención de líneas haploides. Entre las plantas que han sido micropropagadas se encuentran: ciruela, cereza, durazno, manzana, pera, cítricos, papaya, plátano, olivo y café. Las variedades propagadas por cultivo de anteras son: ciruela, cereza, durazno, manzana, limón, papaya y café (Bajaj 1986).

Forestales

Al igual que los árboles frutales, en las variedades forestales se han desarrollado principalmente los métodos de micropropagación por organogénesis y embriogénesis. Actualmente se ha logrado la obtención de líneas haploides a través del cultivo de anteras. Dentro de las variedades más importantes que han sido micropropagadas se encuentran: acacia, jacarandá, álamo, eucalipto, sándalo, castaño, almendro, pino y morera. Dentro de las especies cultivadas por anteras se encuentran: pino, jaracandá, álamo, almendro y cocotero (Bajaj 1986).

Leguminosas

Dentro de esta familia, los avances más importantes se han logrado en soja y alfalfa, donde se han desarrollado las técnicas de micropropagación. Existen reportes de nuevas variedades seleccionadas por variación somaclonal. El frijol es, entre las leguminosas, la planta donde menores éxitos se han obtenido por cultivo de tejidos. En particular, en la soja se ha logrado la micropropagación a partir de meristemos apicales, la producción de líneas haploides por cultivo de anteras y la regeneración de plantas a partir de cultivos primarios, células en suspensión y callos.

Florales

Entre las especies vegetales, donde mayor éxito comercial han tenido las técnicas de cultivo de tejidos es en las variedades ornamentales. En general, el cultivo *in vitro* de plantas ornamentales se ha enfocado hacia la selección de variedades libres de virus y hacia la micropropagación de yemas axilares a partir de meristemos apicales.

De la misma manera se han desarrollado los métodos de variación somaclonal para la obtención de nuevas variedades con mayor tamaño de la flor, mayor contenido de pigmentos y mayor tamaño del tallo. Dentro de las variedades ornamentales más importantes se encuentran: rosas, crisantemos, gerberas, orquídeas, claveles y petunias. Estas últimas, debido a sus caracteres genéticos, han sido empleadas como sistemas modelo para las técnicas de ingeniería genética.

Existen otras plantas de menor importancia agrícola, donde se han desarrollado con éxito las técnicas de cultivo de tejidos, principalmente con la finalidad de obtener nuevas variedades por variación somaclonal y para micropropagación. Dentro de las más significativas se encuentran: fresa, zanahoria, uva, apio, lechuga, pepino, calabaza, pimiento o chile, coliflor y lino.

De esta última, recientemente, se liberó una variedad resistente al moho que fue aislada al seleccionar variedades resistentes a NaCl, lo cual es otro ejemplo de tolerancia cruzada al estrés.

Perspectivas del cultivo de tejidos vegetales

Existe una serie de fenómenos y técnicas reportadas recientemente que —se piensa— incidirán de manera significativa en el desarrollo del cultivo de tejidos vegetales:

- La tolerancia cruzada al estrés. Los reportes en diferentes plantas como lino, tabaco (Huang y Goldsbrough 1988; Harrington y Alm 1988), sorgo y zanahoria, relacionados con este fenómeno cuyas bases bioquímicas se han empezado a estudiar, sugiere la existencia de un mecanismo común que permite a la planta contender con diversos factores externos.

Los conocimientos que se generen sobre el tema permitirán establecer, de manera más precisa, los métodos de selección de variedades tolerantes a diferentes tipos de estrés, entre los que se destacan: desecación, metales pesados como Cd y Cu, altas temperaturas, ataque por algún insecto, resistencia a salinidad y resistencia a bajas temperaturas. En general se requiere avanzar en los aspectos bioquímicos y moleculares que participan en la tolerancia y/o resistencia al estrés.

- Integridad de la membrana y organización de la pared celular como factores fundamentales para la regeneración de protoplastos y el desarrollo de embriones somáticos. En este campo existen trabajos recientes, por medio de los cuales se demuestra que diversos agentes físicos y químicos favorecen la regeneración de las plantas. En general se vislumbra que estos agentes pueden estar actuando en el mantenimiento de la integridad de la membrana en el caso de protoplastos y en la reestructuración ordenada de la pared celular.

En **caña de azúcar**, se informa de un método que mantiene la capacidad de regeneración de los callos y que la aplicación de una corriente eléctrica incrementa la regeneración de plantas a partir de callos (Chen *et al.* 1988).

En **alfalfa**, se reporta que la aplicación de un campo eléctrico promueve la formación ordenada de la pared celular de protoplastos, lo cual incrementa la formación directa de embriones somáticos y reduce las aberraciones genéticas que se generan en el cultivo (Galiba y Yamada 1988).

En la **zanahoria**, se indica que diferentes tipos de luz afectan el desarrollo de embriones somáticos (Michler y Berger 1987).

En **avena y maíz**, se observó que la poca viabilidad de los protoplastos se debe a la liberación de radicales de oxígeno durante la degradación de la pared y que el empleo de agentes antioxidantes aumenta la viabilidad.

En **trigo**, la aplicación del NaCl y KCl estimula la producción de embriones somáticos, al parecer, por inhibición de la germinación precoz de los embrioides. Esto indica que los conocimientos sobre la síntesis y estructuración de la pared celular, así como los factores que pueden modificarla, serán de gran importancia para lograr una mayor eficiencia en los métodos de embriogénesis somática.

- Cultivos autotróficos. Existen trabajos recientes por medio de los cuales se logra la regeneración y micropropagación, cultivando los explantes en atmósferas enriquecidas de CO₂. En papa, fresa, coliflor y violeta africana se lograron establecer los métodos de micropropagación, utilizando altas concentraciones de CO₂. Estas técnicas, establecidas y mejoradas, permitirían un avance cuántico en el área; ya que se reducirá de forma sustancial el costo de los medios, por no requerir de una fuente de carbón e incidencia de contaminantes, lo que hará más eficientes los métodos.
- Un factor fundamental para que las técnicas de cultivo de tejidos vegetales desarrollen todo su potencial, es la implementación de la investigación básica que permita conocer los eventos moleculares y las características genéticas que intervienen en los procesos de diferenciación y organogénesis, así como en las rutas de biosíntesis de metabolitos secundarios.

Cuadro B5. Plantas seleccionadas por cultivo de tejidos con características agrícolas importantes.

Plantas	Características
Maíz Arroz Trigo Zanahoria Tabaco	Resistencia a bajas temperaturas
Trigo Tabaco	Resistencia a desecación y altas temperaturas

Cuadro B5. (Cont.)

Plantas	Características
	Resistencia a herbicidas
Tabaco	(bentazon) (isopropil- N-fenilcarbamato) (paraquat) (fenmedifarm) (picloram)
<i>Catharanthus</i>	(glifosato)
Trébol	(2, 4 D)
<i>Lotus</i>	(2, 4 D)
Tomate	(sulfonilurea)
	Resistencia a patógenos
Papa	<i>Fusarium oxysporum</i> <i>Phytophthora infestans</i>
Apio	<i>Fusarium</i>
Maíz	<i>Helminthosporium</i>
Cebada	<i>Fusarium</i> <i>Helminthosporium</i>
Tabaco	Moho azul Virus del Mosaico de la Alfalfa
Tomate	Virus del Mosaico del Tabaco
Manzana	<i>Erwinia</i>
Lino	Moho
Trigo	<i>Helminthosporium</i>
Arroz	<i>Fusarium</i>
	Resistencia a sal y metales pesados
Pimienta	(NaCl)
Alfalfa	(NaCl)
Arroz	(NaCl y Cd)
Tabaco	(NaCl)
Sorgo	(NaCl)
Lino	(NaCl)
Tomate	(Cd)
Tabaco	(Cd)

Cuadro B5. (Cont.)

Plantas	Características
	Nutrientes importantes
Arroz	Líneas de grano grande, con mayor contenido de lisina y proteínas de almacenamiento en la semilla.
Tomate	Líneas con mayor contenido de sólidos. Líneas carentes de pedículo. Líneas de maduración retrasada.
Papa	Líneas de alta calidad nutricia. Líneas libres de virus.

Fuente: Elaboración del autor 1989.

BIBLIOGRAFIA APENDICE B

- ABDULLAN, R.; COCKING, E.C.; THOMPSON, J.A. 1986. Efficient plant regeneration from rice protoplasts through somatic embryogenesis. *BIO/TECHNOLOGY* 4:1087-1090.
- BAJAJ, Y.P.S. (ED.). 1987. *Biotechnology in agriculture and forestry*. Springer-Verlag. v. 3.
- _____. 1986. *Biotechnology in agriculture and forestry: Trees. I*. Springer-Verlag.
- CHAWLA, H.S.; WENZEL, G. 1987. *In vitro* selection of barley and wheat for resistance against *Helminthosporisativum*. *Theoretical Applied Genetics* 74:841.
- CHEN, T.H.H.; LAZAR, M.D.; SCOLES, G.J.; GUSTA, L.V.; KARTHA, K.K. 1987. Somaclonal variation in a population of winter wheat. *Journal of Plant Physiology* 130:27.
- CHEN, W.H.; DAVEY, M.R.; POWER, J.B., COOKING, E.C. 1988. Control and maintenance of plant regeneration in sugar cane callus cultures. *Journal of Experimental Botany* 39:251.
- GALIBA, G.; YAMADA, Y. 1988. A nivel method for increasing the frequency of somatic embryogenesis in wheat tissue culture by NaCl and KCl supplementation. *Plant Cell Reports* 7:55-58.
- HARRINGTON, H.M.; ALM, D.M. 1988. Interaction of heat and salt shock in cultured tobacco cells. *Plant Physiology* 88:618-625.
- HUANG, B.; HATCH, E.; GOLDBROUGH, P.B. 1987. Selection and characterization of cadmium tolerant cells in tomato. *Plant Science* 52:211.
- _____; GOLDSBROUGH, P.B. 1988. Cadmium tolerance in tobacco cells culture and its relevance to temperature stress. *Plant Cell Reports* 7:119-122.

- HUBERTTY, C.; SCHEINERT, H.; STEUP, C.; DIETRICH, B. 1984. Embryogenesis and carmenalide formation in tissue cultures of *Digitalis lanata*. *Pythochemistry* 23:1407-1412.
- LINDSEY, K.; YEOMAN, M.M. 1983. The relationship between growth rate, differentiation and alkaloid accumulation in cell cultures. *Journal of Experimental Botany* 34:1055-1065.
- LING, D.H.; MA, Z.R.; CHEN, W.Y.; CHEN, M.F. 1987. Male sterile mutant from somatic cell culture of rice. *Theoretical Applied Genetics* 75:125-127.
- MICHLER, C.M.; BERGER, D.L. 1987. Effects of light on somatic embryo development and abscisic leves in carrot suspension cultures. *Plant Cell Tissue and Organ Culture* 11:189.
- PARR, A.J. 1989. The production of secondary metabolites by plant cell cultures. *Journal of Biotechnology* 10:1-26.
- PIRT, J. 1987. Microbial physiology in the penicillin-fermentation. *Trends in Biotechnology* 5:64-69.
- RAJ BHANDARY, S.B.; COLLIN, H.A., THOMAS, E.; STREET, H.E. 1969. Root, callus, and cell suspension cultures, from *Atropa belladonna* L. and *Atropa belladonna*, cultivar *lutea* Doll. *Annals of Botany* 33:647-656.
- SCHAEFFER, G.W.; SHARPE, F.T. 1987. Increased lysine and seed storage protein in rice plants recovered from calli selected with inhibitory levels of lysine plus threonine and S-(2-amino ethyl) cysteine. *Plant Physiology* 84:509-515.
- STABA, E.J. 1989. *Plant tissue culture as a source of biochemicals*. CRC Press.
- TUZUM, S.; KUC, J. 1987. Persistence of induced systemic resistance to blue mold in tobacco plants derived via tissue culture. *Phytopathology* 77:1032-1035.

Esta edición se terminó de imprimir
en la Sede Central del IICA
en Coronado, San José, Costa Rica,
en el mes de marzo de 1993,
con un tiraje de 1200 ejemplares.

PROGRAMA II: Generación y Transferencia de Tecnología

El Programa de Generación y Transferencia de Tecnología fue creado como respuesta a dos aspectos básicos: el reconocimiento por parte de los países y de la comunidad técnica y financiera internacional de la importancia de la tecnología para el desarrollo productivo del sector agropecuario; y la convicción de que el potencial de la ciencia y la tecnología sólo puede ser plenamente explotado a partir del desarrollo de infraestructuras institucionales capaces de generar respuestas técnicas apropiadas a las condiciones específicas de cada país, en un marco de políticas que alienten y faciliten la incorporación de nueva tecnología en el proceso de producción.

En este contexto, el Programa II promueve y respalda acciones en los países miembros para mejorar el diseño de políticas tecnológicas, reforzar la organización y la administración de los sistemas de generación y transferencia de tecnología, y facilitar la transferencia internacional de tecnología.

Se espera que estas acciones conduzcan a un uso más racional de los recursos disponibles y hagan más efectiva la contribución para resolver los problemas tecnológicos de la producción agrícola, dentro de un marco de equitativa distribución de los beneficios y de conservación de los recursos naturales.

De acuerdo con el Plan de Mediano Plazo vigente, el Programa de Generación y Transferencia de Tecnología, para abordar estos problemas, concentra sus actividades en cinco áreas básicas:

- Diseño de una política tecnológica.
- Organización y administración en los sistemas e instituciones nacionales de generación y transferencia de tecnología.
- Desarrollo y/o fortalecimiento de los programas de capacitación de los recursos humanos.
- Cooperación recíproca y coordinación internacional en investigación y transferencia de tecnología.
- Formulación e implementación de proyectos de inversión.

El Programa II busca alcanzar sus objetivos primarios contribuyendo a resolver algunos de los principales problemas que limitan el desarrollo agrícola y el bienestar rural en los países de la región. Para ello impulsa y estimula la vinculación de la política tecnológica del sector agropecuario con otros aspectos de la política económica general; ayuda al fortalecimiento de la organización y la capacidad económica de las instituciones tecnológicas, la consolidación de los recursos humanos calificados, la capacitación y especialización de los nuevos cuadros profesionales; promueve la transferencia internacional de tecnología y la integración de la investigación a nivel nacional e internacional.

Importancia especial se da a los esfuerzos regionales que se espera permitan estrechar la amplia brecha que afrontan la mayoría de los países pequeños en cuanto a sus necesidades de desarrollo tecnológico y la cantidad de recursos que pueden invertir.

INSTITUTO INTERAMERICANO DE
COOPERACION PARA LA AGRICULTURA

LICA

BIBLIOTECA

BOGOTÁ - COLOMBIA

Digitized by Google

SERIE DOCUMENTOS DE PROGRAMAS
PROGRAM PAPERS SERIES

- 1 LOS PROGRAMAS DE AJUSTE ESTRUCTURAL Y SECTORIAL: Alcances para la Reactivación y Desarrollo de la Agricultura. Agosto 1987/IICA
- 2 FOROS INTERNACIONALES SOBRE PRODUCTOS AGRICOLAS: Situación y Perspectivas. Agosto 1987/H. Rodas Melgar
- 3 CAPACITACION CAMPESINA: Un Instrumento para el Fortalecimiento de las Organizaciones Campesinas. Octubre 1987/IICA
- 4 TECHNOLOGICAL INNOVATIONS IN LATIN AMERICAN AGRICULTURE. November 1987/A. de Janvry, D. Runsten, E. Sadoulet
- 5 EXPERIENCIAS EN LA APLICACION DE ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LA POBREZA RURAL. Diciembre 1987/F. Jordán, D. Londoño
- 6 LAS AGRICULTURAS DE LOS PAISES DE AMERICA LATINA Y EL CARIBE EN LA CRISIS ACTUAL: Condiciones, Desempeño y Funciones. Julio 1988/M. Kaminsky
- 7 LA NUEVA BIOTECNOLOGIA EN AGRICULTURA Y SALUD. Julio 1988/IICA
- 8 AGRICULTURA Y CAMBIO ESTRUCTURAL EN CENTROAMERICA. Octubre 1988/H. Fallas, E. Rivera
- 9 MEXICO EN LA RONDA URUGUAY: El Caso de la Agricultura. Enero 1989/C. Luiselli Fernández, C. Vidali Carbajal
- 10 LA ECONOMICA CAMPESINA EN LA REACTIVACION Y EL DESARROLLO AGROPECUARIO. Febrero 1989/IICA
- 11 HUMAN CAPITAL FOR AGRICULTURAL DEVELOPMENT IN LATIN AMERICA. June 1989/G. E. Schuh, M.I. Angeli-Schuh
- 12 RURAL DEVELOPMENT IN LATIN AMERICA: An Evaluation and a Proposal. June 1989/A. de Janvry, R. Marsh, D. Runsten, E. Sadoulet, C. Zabin
- 13 HACIA UNA ESTRATEGIA TECNOLOGICA PARA LA REACTIVACION DE LA AGRICULTURA DE AMERICA LATINA Y EL CARIBE. Julio 1989/E. Trigo, D. Runsten
- 14 LAS POLITICAS MACROECONOMICAS Y LA AGRICULTURA. Setiembre 1989/C. Pomareda, R. Norton, L. Reza, J. Torres Zorrilla
- 15 ACCESO A MERCADOS Y COMERCIO INTRARREGIONAL. Setiembre 1989/A. de la Ossa, A. Guerra-Borges
- 16 INVERSION Y MECANISMOS PARA LA MOVILIZACION DE RECURSOS FINANCIEROS PARA LA AGRICULTURA. Setiembre 1989/R. Vásquez, R. Webb, C. Pomareda, F. Cirio
- 17 AMERICA LATINA Y EL CARIBE: Pobreza Rural Persistente. Enero 1990/IICA
- 18 BIOTECNOLOGIA E INDUSTRIA: Un Ensayo de Interpretación Teórica. Noviembre 1990/I. Avalos Gutiérrez
- 19 TECNOLOGIAS DE AMERICA DEL NORTE PARA EL PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS. Noviembre 1990/P. G. Müller, R. Riel
- 20 NUEVAS ESTRATEGIAS EN LA TRANSFERENCIA DE TECNOLOGIA AGROPECUARIA PARA EL ISTMO CENTROAMERICANO. Noviembre 1990/D. Kaimowitz, D. Vartanián
- 21 LA COOPERACION TECNICA EN LOS PRESTAMOS DE AJUSTE SECTORIAL AGROPECUARIO: La Experiencia Argentina. Febrero 1991/C. Garramón, E.S. de Obschatko
- 22 TRANSFORMACIONES ESTRUCTURALES Y RELACIONES INTERSECTORIALES DE LA AGRICULTURA EN AMERICA LATINA Y EL CARIBE. Agosto 1991/J. Torres Zorrilla
- 23 LA PROBLEMATICA DEL DESARROLLO DE LAS AGROBIOTECNOLOGIAS EN AMERICA LATINA Y EL CARIBE. Setiembre 1991/W. R. Jaffé
- 24 APERTURA ECONOMICA: Características e Implicaciones para el Sector Agroalimentario en América Latina y el Caribe. Setiembre 1991/R. A. Trejos, C. A.M. Santana
- 25 BASES PARA UNA AGENDA DE TRABAJO PARA EL DESARROLLO AGROPECUARIO SOSTENIBLE. Setiembre 1991/IICA También disponible en inglés.
- 26 THE SINGLE EUROPEAN MARKET OF 1992: Implications and Policy Options for Caribbean Agriculture. September 1991/D. Budhram, L. Rock
- 27 ARMONIZACION DE POLITICAS Y MODERNIZACION DE LA AGRICULTURA EN CENTROAMERICA: Estrategia en Procesos de Ajuste y Apertura Económica. Febrero 1992/R.A. Trejos, C. Pomareda, D. Herrera
- 28 MODERNIZACION DEMOCRATICA E INCLUYENTE DE LA AGRICULTURA EN AMERICA LATINA Y EL CARIBE. Abril 1992/F. Calderón, M. Chiriboga, D. Piñeiro
- 29 EL COMERCIO INTRARREGIONAL DE GRANOS BASICOS EN CENTROAMERICA. Junio 1992/D. Herrera, M. Jiménez
- 30 EL APOYO TECNOLOGICO NECESARIO PARA PROMOVER LAS EXPORTACIONES AGRICOLAS NO TRADICIONALES EN AMERICA CENTRAL. Julio 1992/D. Kaimowitz
- 31 CONSERVACION DE LOS RECURSOS NATURALES, MEDIO AMBIENTE Y COMERCIO INTERNACIONAL: Una visión desde América Latina y el Caribe. Setiembre 1992/M. Otero, G. Estefanell, E. Trigo
- 32 DESARROLLO RURAL MICRORREGIONAL Y DESCENTRALIZACION. Febrero 1993/M. Chiriboga, O. Plaza
- 33 SOSTENIBILIDAD Y AGRICULTURA DE LADERAS EN AMERICA CENTRAL. Cambio tecnológico y cambio estructural. Febrero 1993/E. Lindarte, C. Benito
- 34 PROSPECTIVA DE LAS AGROBIOTECNOLOGIAS. Marzo 1993/R. Quintero