

Retos y oportunidades de la biotecnología agroalimentaria

Octavio Paredes López*

Introducción

El ser humano ha modificado plantas en su beneficio durante los últimos 10 000 años, por lo menos. En relación con sus ancestros y, considerando los intereses de la humanidad, el mejoramiento es sorprendente: un cereal, una fruta o una hortaliza actuales pueden quizá tener un rendimiento 10, 20 o aun 100 veces superior al de sus predecesores. Sin embargo, si se consideran los detalles estructurales de las plantas, hay marcadas in-

ficiencias en la proporción de nutrientes que van del suelo a la parte comestible, así como en la captura de carbono (del aire) para la fotosíntesis, que convendría reducir o eliminar. De igual forma, la explotación irracional de estas características provocó un notable deterioro, en ocasiones irreversible, del entorno ecológico.¹ En estas condiciones surge el potencial de la biotecnología para grandes sectores de la sociedad.

Biotecnología es un término genérico que abarca varias técnicas celulares y subcelulares para sintetizar, transformar o hidroliz-

* Profesor-investigador del Laboratorio de Biotecnología de Alimentos, Unidad Irapuato, del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN.

1. Véase Octavio Paredes López, "La biotecnología de plantas: una herramienta estratégica en los programas alimentarios de México", en *Ciencia y Desarrollo*, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), año XII, núm. 68, México, 1986, p. 26.

CUADRO 1

Etapas de la biotecnología

Clasificación	Etapas	Años	Productos o tecnologías específicas
Primera	Anterior a Pasteur	Antes de 1865	Bebidas alcohólicas (cerveza, vino), productos lácteos (queso, yogur) y otros productos fermentados (levaduras, vinagre)
Segunda	Posterior a Pasteur	1865-1940	Etanol butanol, acetona, glicerol, ácidos orgánicos (ácido cítrico), tratamiento aeróbico de efluentes
Tercera	De los antibióticos y de los esteroides	1940-1960	Tecnología de fermentación sumergida, penicilina y una gran variedad de antibióticos, tecnología para el cultivo de células animales, vacunas virales, transformación microbiana de esteroides
Cuarta	Nuevas tecnologías después de los antibióticos	1960-1975	Proteína unicelular, aminoácidos, enzimas (detergentes), enzimas inmovilizadas (isomerasa), tecnología celular, tratamiento anaeróbico de efluentes (biogás), polisacáridos bacterianos (goma y xantana), gashol
Quinta	Tecnología del ADN recombinante	1975-1990	Insulina, renina
Sexta	Ingeniería de proteínas / biología molecular	1980-1990	Subtilisinas modificadas
Séptima	Biología atómica	2000	Nuevas rutas metabólicas para productos biotecnológicos finos

zar diversos materiales y sustancias. Quizá su definición más aceptada sea la que se refiere a la utilización de procesos biológicos que involucran células microbianas de plantas y de animales, o fracciones celulares, para la producción de bienes y servicios.² Es un campo de la actividad científica con nuevas posibilidades, por las herramientas históricas de que dispone y por las técnicas recién elaboradas, como la del ácido desoxirribonucleico (ADN) recombinante, la del cultivo de tejidos y la del desarrollo de sistemas enzimáticos.³ Desde principios de siglo la biotecnología se definió como la tecnología de la "siguiente generación" y el término arraigó.⁴ Sus campos fundamentales de influencia son la agricultura, la medicina, la energía y, en menor medida, la extracción y refinación de minerales y la electrónica.

La biotecnología se ha usado durante más de 8 000 años en la producción de alimentos y bebidas; los ejemplos clásicos son las bebidas alcohólicas, los quesos y el vinagre.⁵

En el cuadro 1 se presentan las etapas históricas de la biotecnología. Durante la primera, la biología tuvo muy pocas bases científicas. El descubrimiento de los microorganismos como los agentes vivos más pequeños, por parte de Van Leeuwenhoek (alrededor de 1650), no condujo a un entendimiento cabal de su enorme importancia. Cuando Pasteur demostró que los microbios vivos son los agentes activos de la fermentación se dio el primer paso

hacia la comprensión de los procesos biológicos. Años más tarde sus descubrimientos condujeron a un notable mejoramiento científico y tecnológico de las bioindustrias artesanales de la época, en especial las dedicadas a la fabricación de vino, cerveza, vinagre y ácidos orgánicos.⁶ Después de Pasteur y en particular durante los primeros 75 años de este siglo se registraron impresionantes avances en lo que ahora se conoce como la microbiología, la bioquímica y los procesos de la ingeniería. Se trasplantaron y aplicaron las tecnologías convencionales derivadas de las industrias alimentarias y químicas a la de las fermentaciones. De esta manera se llegó a la tercera y cuarta etapas, la de los antibióticos (1940-1960) y la de la proteína unicelular, los aminoácidos y las enzimas (1960-1975). Éstas se caracterizaron por el aprovechamiento de las propiedades biosintéticas de los microorganismos y de su capacidad para modificar sustancias, como los esteroides. Las técnicas biológicas que marcaron estas etapas son:

- 1) El aislamiento de los microorganismos que producen o modifican la sustancia de interés.
- 2) El mejoramiento de los rendimientos por medio de mutagénesis al azar de los microorganismos.
- 3) La elevación de los rendimientos mediante la optimización de los nutrientes requeridos por los microorganismos y de las condiciones de cultivo de los mismos.

Estos procedimientos son válidos aún, en especial en la aplicación de técnicas laterales basadas en la separación y detección de sustancias.

Por otro lado, lo que ahora se conoce en algunos círculos como biotecnología moderna comenzó a manifestarse en 1975 con los

2. G.G. Khachatourians y A.R. Mc Curdy, "Biotechnology: Applications of Genetics to Food Production", en D. Knorr (ed.), *Food Biotechnology*, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1987.

3. Véanse J. Davis, "Le génie génétique" y S. Sicsic, "Enzymes et chimie fine", en *La Recherche*, núm. 188, 1987, pp. 572 y 626, respectivamente.

4. Véase R. Bud, "Janus-faced Biotechnology: An Historical Perspective", en *Trends in Biotechnology*, vol. 7, 1989, p. 230.

5. Véase D. Knorr y A.J. Sinskey, "Biotechnology in Food Production and Processing", en *Science*, vol. 229, 1985, p. 229.

6. D. Knorr, "Food Biotechnology", en *Food Technology*, vol. 41, núm. 4, 1987, p. 95.

trabajos pioneros de Cohen y Boyer.⁷ Ellos, empleando bacterias, establecieron las bases de la tecnología del ADN recombinante, que en esencia son:

- 1) El aislamiento del gene que codifica la proteína o sustancia de interés de una fuente natural.
- 2) La clonación del gene en un vector apropiado.
- 3) La transformación de una célula con este vector.
- 4) La expresión de este gene para producir altos rendimientos de la proteína o sustancia de interés.

Con tal procedimiento se logró generar las proteínas insulina y renina, la enzima glucoamilasa y el edulcorante denominado taumatina.⁸

La sexta etapa, denominada ingeniería de proteínas, entraña técnicas mucho más complejas que las de la ingeniería genética, como:

- 1) La introducción de cambios en regiones específicas de un gene con objeto de producir uno nuevo.
- 2) La expresión de la nueva proteína del gene modificado, usando los procedimientos descritos.
- 3) La caracterización de la estructura molecular de esta nueva proteína.
- 4) La determinación de las características funcionales de la nueva proteína.
- 5) La selección de nuevas regiones del gene para modificarlo en función de la información obtenida de la estructura-función de la proteína.

Desde un punto de vista comercial, se espera que estas nuevas proteínas, desconocidas en la naturaleza, desencadenen una fuerte competencia entre las grandes empresas transnacionales. La biología molecular cederá su lugar. Se estima que en el año 2000 se entrará de lleno en el entendimiento y el empleo de la biología atómica, campo científico que, como continuación de las ingenierías de proteínas y de carbohidratos, conducirá a la generación de nuevas rutas metabólicas que podrán implantarse en diversos organismos celulares o en algunas de sus partes, con el propósito de modificar a voluntad su biosíntesis.

El entendimiento público de la biotecnología es un reto conceptual y también un problema político, pues esta tecnología plantea promesas y limitaciones contrapuestas. La prospectiva de una tecnología ecológicamente benigna y significativamente enriquecedora, que ofrece productos más "naturales", contrasta con los temores de daño ambiental y abuso de poder. Resulta útil tomar en cuenta esta paradoja para el análisis que se hace de la biotecnología en este trabajo.

7. S.N. Cohen y H.W. Boyer, "Recombinant Technology in *E. coli*", en *U.S. Patent*, núm. 4 468 454, 1984.

8. J.J. Mac Quity, "Impact of Biotechnology on the Chemical Industry", en M. Phillips et al. (eds.), *The Impact of Chemistry on Biotechnology*, American Chemical Society, Serie núm. 362, Washington, 1988.

Principales características de la biotecnología agroalimentaria

Es pertinente analizar en forma sucinta las principales características de la revolución verde y sus diferencias con la biotecnología. Además del mejoramiento de variedades, los elementos fundamentales de dicha revolución fueron el uso de fertilizantes químicos, plaguicidas, herbicidas, riego, y, en general, de tecnologías intensivas en el consumo de energía de fuentes no renovables. En el futuro la productividad agrícola deberá depender de otro tipo de insumos. Así, se requerirá desarrollar materiales que soporten apropiadamente condiciones ambientales adversas; ampliar la base genética de los materiales; usar con eficiencia los nutrientes y el agua; lograr una mayor eficiencia fotosintética; utilizar más la fijación biológica del nitrógeno y la resistencia a plagas y enfermedades.⁹ El gran reto es lograr que esto no empobrezca la diversidad genética de los materiales y que considere la sostenibilidad, es decir, la capacidad del ecosistema para recuperar su poder productivo normal después de catástrofes naturales.¹⁰

La investigación científica que sustentó el desarrollo tecnológico de la revolución verde la financiaron organismos públicos, sectores gubernamentales de países desarrollados y subdesarrollados y fundaciones internacionales creadas por empresas privadas con impresionantes nombres transnacionales. Estas aprovecharon con amplitud e intensidad los conocimientos obtenidos para comercializar internacionalmente semillas mejoradas, plaguicidas y técnicas agrícolas, entre otros bienes. También fue evidente que los productores históricamente menos favorecidos permanecieron marginados de los cuantiosos beneficios que, según se ha insistido, acompañaron a la revolución verde. No es casual que en México se instalara en los años cuarenta el primer grupo científico internacional, pionero en la revolución verde. Este grupo se estableció posteriormente en el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, el cual pertenece a una red de 13 centros internacionales de investigación agrícola distribuidos en el mundo.¹¹

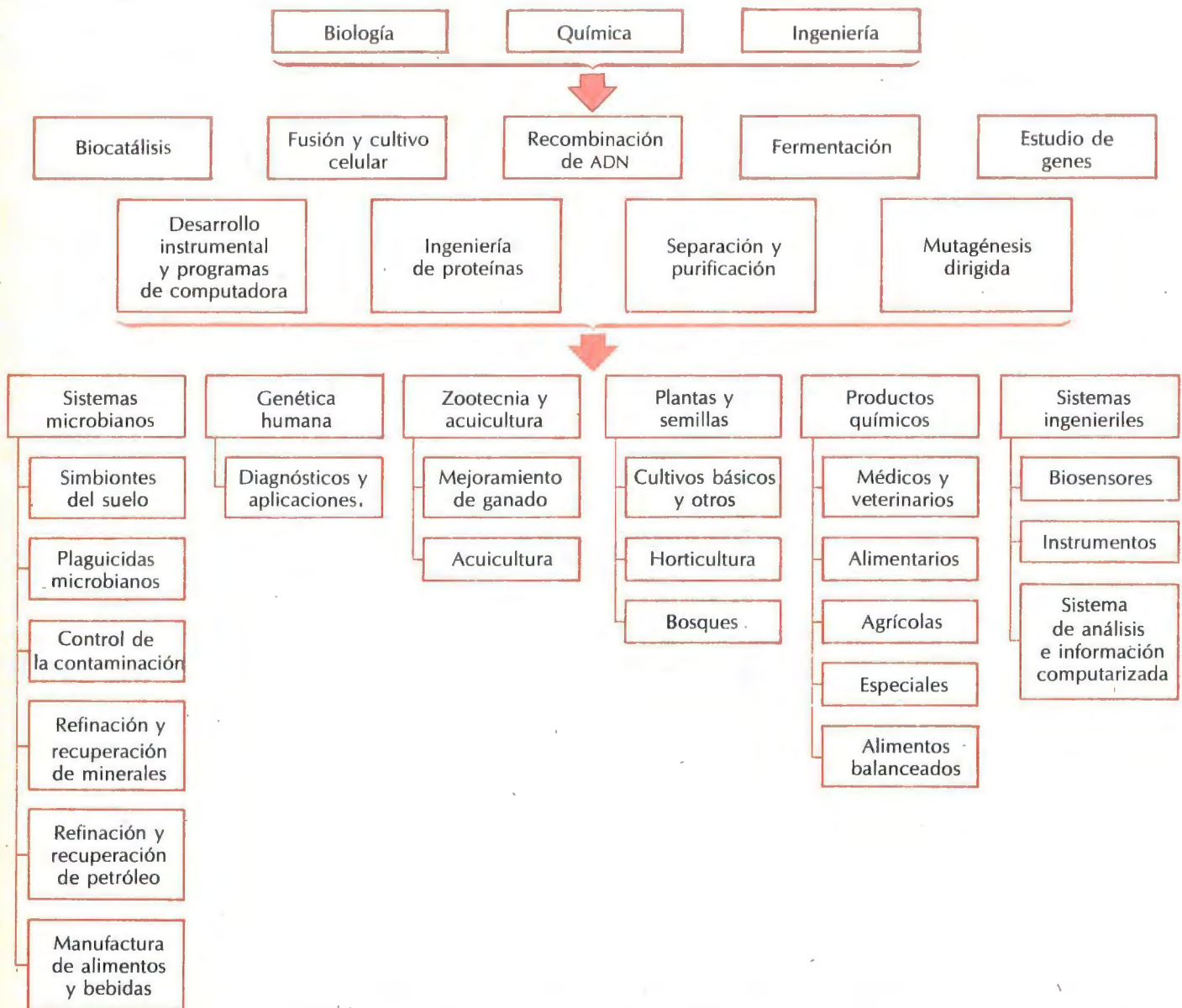
A diferencia de la revolución verde, la biotecnología agroalimentaria se enfrenta a circunstancias esencialmente distintas. Las empresas transnacionales intervienen en la gestación misma de los proyectos biotecnológicos, ya sea que tengan experiencia en el subsector agroalimentario o carezcan de ella. En su búsqueda de la biotecnología que se adapte mejor a los intereses comerciales del fin de este milenio y principios del próximo, y rompiendo con todo tipo de tradiciones, establecen convenios con los grupos universitarios y de centros de investigación más brillantes y mejor estructurados del mundo industrializado y, ocasionalmente, del subdesarrollado. Así, ya no son los organismos públicos con financiamiento estatal los que marcan los rumbos del desa-

9. Véanse Octavio Paredes López, *op. cit.*, y Octavio Paredes López y G.I. Harry, "La ingeniería genética de plantas: una alternativa para la producción de alimentos en México", en R. Quintero (comp.), *Prospectiva de la biotecnología en México*, Fundación Javier Barros Sierra, Conacyt, México, 1985.

10. Véase J.H. Barton, "Legal Trends and Agricultural Biotechnology: Effects on Developing Countries", en *Trends in Biotechnology*, vol. 7, 1989, p. 264.

11. J.I. Cohen, "Biotechnology Research for the Developing World", en *Trends in Biotechnology*, vol. 7, 1989, p. 295.

Componentes fundamentales de la biotecnología



rollo agroalimentario; es el sector privado, principalmente el transnacional, el que ha tomado el control de la biotecnología.¹²

Los componentes fundamentales de la biotecnología se agrupan en las diversas áreas descritas en la gráfica, incluidas desde las actividades más tradicionales, como la producción de bebidas alcohólicas y de quesos, hasta las más refinadas, llamadas de punta, como los biosensores o los anticuerpos monoclonales.¹³

12. Véanse A. Sasson, "Les biotechnologies et la bio-industrie", en *La Recherche*, vol. 18, 1987, p. 726, y E. Galindo, "Biotecnología: oportunidades y amenazas", en *Ciencia y Desarrollo*, año XIV, núm. 80, México, 1988, p. 21.

13. Véanse P. Hall, "Commercial Biotechnology: An Overview", en

Los altos costos de la infraestructura científica y la complejidad de algunos de los procedimientos biotecnológicos de punta, actualmente en pleno desarrollo (ingenierías de proteínas y de carbohidratos, por ejemplo), hacen necesario que los países subdesarrollados elaboren las estrategias más convenientes para mitigar, al menos, los efectos dañinos de la dependencia. La alta tasa de recambio de la biotecnología actual, en los países desarrollados, provoca que los ciclos de obsolescencia sean muy cortos; se estima que sólo la información biotecnológica se duplica cada tres

M. Phillips *et al.*, *op. cit.*, y Octavio Paredes López, "Perspectivas de la biotecnología alimentaria en México", conferencia magistral del XXX Aniversario del Instituto Tecnológico de Celaya, mimeo., Celaya, México, 1990.

años.¹⁴ La investigación en el mundo subdesarrollado se caracteriza por una fuerte dependencia financiera de los gobiernos — con presupuestos exiguos y minados por la pesada deuda externa— y por la debilidad y dispersión de sus recursos humanos y su infraestructura. Asimismo, es nula o mínima la vinculación de esta investigación con los sectores productivos público y privado. En los últimos años se han hecho encomiables esfuerzos para cambiar esta situación en Argentina, Brasil, Cuba, México, la India, Taiwán y Corea.

En el cuadro 2 se enlistan las disciplinas mínimas necesarias para desarrollar y efectuar los procesos biotecnológicos destinados a la biosíntesis de productos agroquímicos. Se requieren desde biólogos moleculares, en un extremo, hasta ingenieros en aspectos económicos, en el otro. Desafortunadamente, como lo ha afirmado el distinguido científico latinoamericano de la Universidad de Buenos Aires, D.J. Goldstein, en América Latina la biología molecular, la química de proteínas y la cristalografía de rayos X están más subdesarrolladas que la economía de la región.¹⁵ Sólo en cinco años la empresa Genencor, Inc., en Estados Unidos, gastó más de 70 millones de dólares en equipo e instalaciones de investigación para un grupo de 80 científicos y técnicos; esta suma no incluye las cuantiosas erogaciones por el entrenamiento de este personal.¹⁶ Dicha inversión equivale a 1.5 veces el presupuesto anual del Conacyt, con el que se cubren los salarios de su personal y se apoya la investigación en todos los campos del conocimiento, en todo México. En la actualidad diez países de Europa Occidental están construyendo las instalaciones necesarias para un sincrotrón de rayos X, que sólo se utiliza en algunos campos de la biotecnología, el cual entrará en operación a mediados de este decenio y tendrá una inversión superior a 700 millones de dólares.¹⁷

CUADRO 2

Disciplinas mínimas necesarias para la aplicación de la biotecnología orientada a la manufactura de productos químicos

Química de proteínas	Enzimología
Química de carbohidratos	Cristalografía de rayos X
Fisicoquímica de macromoléculas	Ciencia y tecnología de fermentaciones
Genética	Ingeniería bioquímica
Microbiología	Ingeniería de procesos
Fisiología microbiana	Diseño de operaciones
Análisis de compuestos	Ingeniería mecánica
Química orgánica	Ingeniería económica

En el caso de las tecnologías de punta, los países en desarrollo tienen que definir las estrategias que se adapten mejor a sus necesidades y etapas de desarrollo. La transferencia de genes de pro-

teínas de reserva de granos básicos no tiene la misma importancia para las empresas transnacionales y los países industrializados que para la mayoría de las naciones en desarrollo. Para estas últimas es vital aumentar el contenido y la disponibilidad de aminoácidos esenciales para el organismo humano, como la lisina y el triptofano en el maíz y la metionina en el frijol; es decir, requieren mejorar significativamente la calidad nutricional de la dieta.¹⁸

CUADRO 3

Estimación del valor mundial de venta de diversos productos biotecnológicos, 1985-1995 (Millones de dólares a precios constantes)

Mercados	Valor de venta			Tasa anual de crecimiento
	1985	1990	1995	
Medicamentos				
Terapéuticos	100	1 400	4 250	39
De diagnóstico	250	1 500	4 500	37
Vacunas	—	100	1 000	59
Productos químicos				
Enzimas industriales	—	25	50	15
Polímeros solubles al agua	—	25	100	32
Alimentos				
Aditivos e ingredientes	1 500	2 000	4 000	10
Saborizantes	—	100	200	15
Aditivos para alimentación animal	—	50	500	59
Tratamiento de efluentes	—	500	1 000	15
Agricultura				
Semillas / plantas (por métodos recombinantes)	—	100	1 000	59
Inoculantes microbianos	—	50	500	59
Plaguicidas microbianos	—	50	150	25
Instrumentación				
Biorreactores de laboratorio	100	180	320	12
Biosensores	—	25	100	32
Sistemas computacionales	50	100	200	15
Instrumentación de laboratorio	275	675	1 700	20
Equipo de procesamiento	130	200	270	8
Centros fabriles	60	100	130	8
Total	2 465	7 180	19 970	23

Por otro lado, nunca se insistirá lo suficiente en que los países subdesarrollados aprovechen de modo intensivo biotecnologías tradicionales, ya que las características de éstas se adaptan adecuadamente a sus necesidades y circunstancias actuales.¹⁹ Hay

14. Véanse Institute of Food Technologists, "Special Report. America's Food Research: An Agend for Action", en *Food Technology*, vol. 39, núm. 6, 1985, p. 81, y A.J. Sinskey, "The Effects of Development in Biotechnology on the Third World", en ONUDI, ID/WG, núm. 412, 1984.

15. Véase J. Goldstein, "An Impending Disaster for Latin America: X-ray Crystallography and Protein Engineering", en *Interciencia*, vol. 15, Buenos Aires, 1990, p. 15.

16. J.J. Mac Quity, *op. cit.*

17. D.J. Goldstein, *op. cit.*

18. Octavio Paredes López, C. Ordorica Falomir, F. Guevara Lara y M.M. Covarrubias Álvarez, "Las proteínas vegetales: presente y futuro en la alimentación", en R. Quintero (comp.), *Prospectiva de la biotecnología en México, op. cit.*

19. Véase Octavio Paredes López y G.I. Harry, "Food Biotechnology Review: Traditional Solid-State Fermentations of Plant Raw Materials—Application, Nutritional Significance and Future Prospects", en *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 27, 1988, p. 159.

CUADRO 4

Proteínas recombinadas disponibles en el mercado

	<i>Año de clonación</i>	<i>Inicio de ensayos clínicos</i>	<i>Autorización legal</i>	<i>Empresas principales</i>
Insulina humana	1978	1980	1982 (Reino Unido)	Lilly, Genentech, Novo, Nordisk Gentoft
Hormona del crecimiento humano	1979	1981	1985 (Estados Unidos)	Lilly, Genentech, Sanofi, Nordisk Gentoft, Ares-Serono, KabiVitrum, Genentech, B.T.G., Sumitomo / Genentech
Interferones Alfa	1980	1981	1986 (Estados Unidos)	Welcome-Sumitomo, Hoffman-Laroche / Genentech, Takeda-Hoffman Laroche, Schering Plough / Biogen
Beta	1981	1982	1986 (Japón)	Toray, Sunsong-Toray, Schell / Cetus, Rentschler
Gamma	1981	1982	1988 (RFA)	Baxter / Biogen, Kyowa, Hoffman-Laroche
Activador tisular de plasminógeno	1982	1984	1987 (Francia)	Genentech, Boeringher I. / Genentech, Mitsubishi / Genentech, Kyowa / Genentech, Ashahi, Welcome / Genetic Institute
Eritropoatina	1985	1986	1988 (CEE)	Johnson and Johnson / Amgen, Upjohn-Chugai / Genetic Institute, Behringwerke / Integrated Genetics, Kirin / Amgen, Boeringher M.

que abandonar los falsos debates entre investigación básica y aplicada, entre la de corto y largo plazos, en favor de una investigación de alta calidad. Ésta debe ser multidisciplinaria y de gran flexibilidad. Asimismo, debe adaptarse con rapidez a los cambios —cada vez más acelerados— y considerar tanto las crecientes necesidades del entorno social como la formación de los recursos humanos que desempeñarán su quehacer científico sobre todo en el próximo siglo.

Repercusiones de la biotecnología

La velocidad, la extensión y la profundidad de las aplicaciones de las biotecnologías de punta en el ramo agroalimentario no son cuestiones meramente técnicas. La excitación y el entusiasmo embarga a científicos de todo el orbe (sobre todo a los de las áreas biológicas y químicas) y a no pocos políticos acerca de las oportunidades que ofrece la biotecnología. Pese a ello, su adopción por parte de los agricultores, los hombres de negocios en el agro y aun los grupos campesinos dependerá en buena medida de sus resultados económicos.²⁰ En última instancia, fuera del mundo científico es poco el interés por la esencia científica de

los métodos para generar insumos agrícolas o por cómo se procesan los productos del campo. Para esos grupos es irrelevante si la somatropina bovina (un promotor del crecimiento) se obtiene mediante la biotecnología u otro método.

Los aspectos que sí interesarán a productores del campo, economistas, sociólogos y políticos son la demanda de productos agropecuarios —tanto de las empresas procesadoras como del público en general—, con los efectos de esas innovaciones en costos y utilidades, y los cambios estructurales que genere la aplicación de las nuevas tecnologías.

En el cuadro 3 se estiman el valor de las ventas y la tasa de crecimiento de los diversos productos biotecnológicos.²¹ Según esta fuente, los productos de interés médico alcanzarán en 1995 los valores más elevados, aunque otras estimaciones colocan en primer lugar a los agroalimentarios.²² En cualquier caso, la suma de los productos incluidos en los rubros de alimentos y agricultura alcanza montos muy elevados y, algunos de ellos, muy altas tasas de crecimiento.

El comportamiento del mercado de productos farmacéuticos elaborados mediante la ingeniería genética es de sumo interés.

20. Véase A. Buckwell y A. Moxey, "Biotechnology and Agriculture", en *Food Policy*, vol. 15, núm. 2, 1990, p. 44.

21. Stanford Research Institute International, *Current and Projected Markets for Biotechnological Products*, Menlo Park, California, 1989.

22. A. Sasson, "Les biotechnologies . . .", *op. cit.*

En el decenio pasado aparecieron en el mercado las cinco únicas proteínas de esta naturaleza que han alcanzado la fase comercial (véase el cuadro 4). Aunque se acortó el período de desarrollo y puesta a punto de los productos farmacéuticos, de diez o doce años en forma convencional, hasta cinco años con ingeniería genética, no puede negarse que el éxito comercial ha sido menor que el esperado. Ello, a pesar de la gran experiencia de las empresas en el manejo de nuevas tecnologías y en comercialización. Tres productos han logrado generar ganancias: la insulina humana, la hormona del crecimiento y el activador tisular de plasminógeno.²³ Es necesario esperar algunos años para tener una idea más certera de estos aspectos.

CUADRO 5

El acelerado efecto de la biotecnología: el caso de las enzimas industriales

	Número aproximado de enzimas disponibles
Fermentación clásica	15-20
Tecnología del ADN recombinante	5-10 000
Ingeniería de proteínas	20 ³⁰⁰
Biología atómica	Infinito

CUADRO 6

Empleo de nuevas biotecnologías económicamente competitivas en escala industrial

Sustrato	Producto	Enzima inmovilizada
Fenilalanina + ácido aspártico	Aspartame	Termolisina
Jarabe glucosado	Jarabe de maíz alto en fructuosa (42%)	Glucosa isomerasa
Bencil penicilina	Ácido penicilánico 6-amino	Penicilina acilasa
Lactosa (suero lácteo)	Glucosa, galactosa	Lactasa

En el campo específico de la tecnología enzimática, el éxito de la biotecnología es evidente en materia de disponibilidad, en cuanto a número y características, de enzimas o biocatalizadores industriales. Ya se tienen algunas para propósitos agroalimentarios que soportan condiciones adversas (como temperaturas elevadas, altos grados de acidez y de alcalinidad) y con capacidades hidrolíticas que no se tenían antes. El cuadro 5 muestra la disponibilidad creciente de este tipo de enzimas; se espera contar en el futuro cercano con cualquier enzima que se desee, según las características que se requieran.

Algunos procesos biotecnológicos de punta económicamente competitivos se relacionan con la producción de edulcorantes y productos farmacéuticos (véase el cuadro 6). El empleo de enzimas inmovilizadas con un mejor comportamiento biofísicoquímico contribuyó a la economía de estos procesos. Las repercusiones comerciales reales de la biotecnología de tercera generación han sido inferiores a las grandes expectativas que se forjaron en la úl-

tima década.²⁴ Los productos de la primera generación son, entre otros, las bebidas alcohólicas y los lácteos y los de la segunda, aminoácidos y antibióticos.

Mientras que el desplazamiento de productos no agrícolas puede crear algunos nuevos mercados, la biotecnología puede originar una redistribución de las cuotas existentes de los productos agrícolas, así como un desplazamiento total de los mismos. Los datos del cuadro 7 ilustran el caso de los edulcorantes. En 1975, en Estados Unidos, el jarabe de maíz alto en fructosa (JMAF), cuya tecnología estuvo a punto a principios de ese decenio, empezó a afectar notablemente la cuota proporcional de la sacarosa, el edulcorante "natural" obtenido industrialmente después de decenas de años; se estima que en 1990 la sacarosa habrá descendido hasta 60%. El aspartame ocupa también un lugar importante en el consumo y se espera que otros edulcorantes artificiales incrementen su participación.²⁵ La velocidad de este desplazamiento dependerá, en buena medida, del comportamiento del mercado.²⁶ Se considera inevitable una mayor contracción de la producción de sacarosa de caña y de remolacha. En la actualidad, hay un interés creciente por la sustancia con el mayor poder edulcorante conocido hasta ahora, la taumatina, constituida por una familia de cinco o más proteínas. Este compuesto se obtiene del fruto de un arbusto y, a diferencia de los azúcares, no afecta la dentadura y pueden consumirlo los diabéticos. Además

CUADRO 7

Tendencias del consumo per cápita de edulcorantes en Estados Unidos (Porcentajes)

Año	Sacarosa (%)	Jarabe de maíz alto en fructuosa (%)	Aspartame (%)	Total (kg/año)
1970	84.1	0	0	55.0
1975	77.5	3.8	0	56.0
1980	68.0	16.4	0	58.2
1985	65.0	18.5	8.1	67.7
1990 ^a	60.0	21.0	9.5	69.2

a. Estimado.

24. J. Davis, "Le génie génétique", *op. cit.*

25. Véanse A.J. Hacking, "Economic and Commercial Factors Influencing the Role of Biotechnology in the Food Industry", en R.D. King y P.S.J. Cheetham (eds.), *Food Biotechnology*, vol. 2, 1988, p. 25, y R. Bernetti, "From Corn Syrup to Fructose", en *Cereal Foods World*, vol. 35, 1990, p. 390.

26. Véase F. Chesnais, "La biotecnología y la exportación de productos agrícolas", en *Comercio Exterior*, vol. 40, núm. 3, México, marzo de 1990, p. 256.

23. Véase F. Leveque, "Les produits biotechnologiques à l'épreuve du marché", en *La Recherche*, vol. 21, 1990, p. 119.

la empresa inglesa Tate and Lyle ha descubierto que también se puede utilizar como aditivo en alimentos para animales. Este edulcorante proteínico comienza a producirse biotecnológicamente y ya está en el mercado.²⁷

Como se mencionó, muchos países subdesarrollados poseen la capacidad suficiente para adaptar e implantar diversos procesos biotecnológicos basados en tecnologías tradicionales y en conocimientos disponibles en el mercado abierto. Debe subrayarse que son erróneas las políticas de los centros científicos internacionales y de los organismos nacionales que, por una fe ciega y absoluta —y por tanto irracional— en las biotecnologías de punta, excluyen el enorme potencial de las tradicionales en el aprovechamiento de los recursos agroindustriales regionales. Más aún, una notable proporción de la esencia científica de buen número de procesos y metodologías biotecnológicas proviene del ingenio de las culturas antiguas.

Por razones de espacio no es posible describirlas de modo exhaustivo; sin embargo, se pueden mencionar algunas de las tecnologías tradicionales más sobresalientes: aprovechamiento de subproductos y desperdicios agroindustriales para la producción de alimentos de consumo humano y animal (esto, al mismo tiempo, podría terminar con el empleo de granos en la alimentación animal, que es inconveniente para la ecología); procedimientos sobre ensilaje y composteo; producción de hongos comestibles, de alto valor nutritivo y aceptabilidad, a partir de sustratos celulósicos y de otras materias primas; tratamiento de efluentes bioindustriales; aprovechamiento de la capacidad genética de diversos materiales que se adaptan mejor a suelos pobres y con poca disponibilidad de agua, y producción de inoculantes para reducir el uso masivo de fertilizantes.²⁸

Recursos económicos y humanos destinados a investigación y desarrollo en biotecnología

Los recursos económicos canalizados por los gobiernos y los grupos industriales de los países desarrollados a la investigación y el desarrollo biotecnológicos de punta son cuantiosos (véase el cuadro 8). Sobresalen las inversiones de Estados Unidos, país que pretende mantener la delantera en este terreno cuando parece haber terminado su hegemonía económica relativa, ante el dinamismo de la integración europea, los notables avances tecnológicos y económicos de Japón, la crisis de los modelos productivos socialistas y la persistencia de la crisis de los países subdesarrollados.²⁹

27. M. Witty, "Thaumatococcus II-a Palatability Protein", en *Trends in Biotechnology*, vol. 8, 1990, p. 113.

28. Véanse Octavio Paredes López y G.I. Harry, "Food Biotechnology Review . . .", *op. cit.*; Octavio Paredes López y A. Alpuche Solís, "Solid Substrate Fermentation—A Biotechnological Approach to Bioconversion of Wastes", en A.M. Martin (ed.), *Bioconversion of Waste Materials to Industrial Products*, Elsevier Applied Sc. Publ., Londres, en prensa, y V. Carrizales y J. Ferrer, "Recycling Agroindustrial Waste by Lactic Acid Fermentations: Coffee Pulp Silage", en *Symposium on the Importance of Lactic Acid Fermentation in the Food Industry*, UAM-Iztapalapa y ONUDI, México, 1984.

29. Véanse P. Hall, "Commercial Biotechnology . . .", *op. cit.*, y R.H. Green, "La evolución de la economía internacional y la estrategia de las transnacionales alimentarias", en *Comercio Exterior*, vol. 40, núm. 2, México, febrero de 1990, p. 91.

CUADRO 8

Erogaciones anuales para investigación y desarrollo de biotecnologías de punta (Millones de dólares)

País	Fuente	
	Gobierno	Industria
Estados Unidos	525	1 500-2 000
Japón	55	1 000
Europa		500 ^a
RFA	76	
Francia	186	
Italia	45	
Bélgica	166	
Países Bajos	14	
Suecia	5	
Reino Unido	12	

a. Inversión de los países de la CEE.

Desde principios de los años ochenta en los países industriales se crearon centenares de empresas biotecnológicas o se iniciaron y reforzaron grupos científicos con impresionante organización y apoyos estratégicos. También en ese decenio comenzó una relación de los grupos industriales con los centros universitarios no conocida antes; estos últimos establecen convenios, principalmente con poderosas empresas transnacionales, que determinan la orientación, los alcances, la operación y el financiamiento de sus proyectos de investigación, amén de la confidencialidad de los resultados. Esto limita la divulgación de técnicas, metodologías y equipos especializados. En la actualidad hay centenares de científicos y técnicos de muy alto nivel, de los centros universitarios del mundo industrializado, involucrados en estos contratos. Es evidente el efecto pernicioso que ello tendrá en los países subdesarrollados, en virtud de su fuerte dependencia científica y estratégica. Más aún, estos acuerdos empiezan a afectar también la recepción de científicos jóvenes del Tercer Mundo, que de manera regular efectuaban tareas de investigación en esos centros para nutrirse de los últimos adelantos del conocimiento.

En México la situación de la biotecnología merece especial atención. Los exiguos presupuestos han originado grupos de biotecnólogos cuya característica fundamental es la debilidad y la dispersión, quizá con algunas honrosas excepciones. Es probable que haya de 25 a 30 biotecnólogos mexicanos, con reconocida capacidad de liderazgo y alta preparación científico-técnica, aún empeñados en mantener vivas las inquietudes académicas propias de este campo. En el ramo industrial las perspectivas de la biotecnología en México, con excepción de la industria cervecera, son similares a las de los otros países del Tercer Mundo; se trata de una industria cuyas decisiones dependen de sus casas matrices, con poca experiencia en el desarrollo y la implantación de tecnologías y limitados conocimientos de las oportunidades en los mercados nacionales e internacionales. En el último decenio se crearon menos de diez empresas biotecnológicas, incluyendo las que ya existían y sólo se orientaron a nuevas ramas agroindustriales. Éstas, principalmente pequeñas y medianas, están incursionando en los campos de edulcorantes sintéticos, micropropagación de plantas (fresa, coliflor, espárragos), enzimas, bioinsecticidas y semillas mejoradas.³⁰

30. Véase Octavio Paredes López, "Perspectivas de la biotecnología alimentaria . . .", *op. cit.*

En los centros dedicados a la formación de recursos humanos de alto nivel (véase el cuadro 9) hay frecuentes altibajos. Esto es resultado de múltiples factores, como apoyos económicos raquíticos y sujetos con frecuencia a los cambios de gobierno, indefinición de estrategias y falta de vinculación al entorno social. Tal desempeño es ejemplo de lo que ocurre en México con este tipo de actividades en la inmensa mayoría de los campos del conocimiento. Quizá la carencia más sobresaliente, de las muchas que hay, es la escasez de científicos consolidados. Ésta se deriva de la "fuga" de cerebros, aunque no exactamente a los países industrializados, sino más bien a otras tareas económica y socialmente más llamativas, pero alejadas de la formación recibida. La carencia de líderes científicos y su movimiento constante, excepto quizá en una o dos de las instituciones mencionadas en el cuadro 9, originan también una notable "volatilidad" en los campos científicos en desarrollo.

CUADRO 9

México: instituciones con programas de posgrado en biotecnología

Institución	Programa	Grado académico ¹
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, Distrito Federal Unidad Irapuato	Biotecnología, bioingeniería Biotecnología de plantas	MC, DC MC, DC
Centro de Investigación sobre Ingeniería Genética y Biotecnología, UNAM, Cuernavaca	Biotecnología	E, MC, DC
Instituto de Investigaciones Biomédicas, UNAM, Distrito Federal	Biotecnología	E, MC, DC
Instituto Tecnológico de Mérida	Biotecnología	MC
Instituto Tecnológico de Veracruz	Biotecnología, bioingeniería	MC
Universidad de Sonora	Biotecnología	E
Universidad Autónoma Metropolitana, Ixtapalapa, Distrito Federal	Biotecnología	MC

1. E = especialización; MC = maestría en ciencias; DC = doctorado en ciencias.

Consideraciones finales

Son tantos los intereses en desarrollar la biotecnología en el mundo actual que resulta imprescindible analizar de modo sistemático su repercusión en las sociedades menos avanzadas, para tomar las medidas más convenientes en aspectos que se caracterizan por su dinamismo. Sorprende que en este momento haya más compañías con biotecnologías de punta que productos en el mercado, provenientes de esos avances.

Se estima que la biotecnología actual tendrá aplicaciones más prontas en la producción y la productividad agroindustrial, más

que en cualquier otra actividad lateral de la misma, en vista de los enormes esfuerzos que los diversos grupos del mundo industrializado han canalizado en esa dirección. La transferencia directa de genes permite introducir características deseables de tipo agronómico (en plantas) y pecuario (en animales). Así, se incrementará de manera notable el potencial productivo de plantas y animales y podrá reducirse la variabilidad atribuible a factores ambientales y patológicos.³¹

La biotecnología tiene características que facilitan la acumulación de excedentes, lo que seguramente originará, en las estructuras actuales, un efecto en cascada sobre los precios. Además, esta disciplina se ha convertido en una actividad intensiva en información. Se prevé que, aun en el Primer Mundo, estas tendencias conduzcan a la concentración de los medios de producción en empresas grandes y de alta eficiencia económica, con la consecuente desaparición gradual de las empresas agrícolas de menor tamaño. Sin embargo, no debe olvidarse que la biotecnología tiene el rostro de Jano: muchas expectativas, que en ocasiones se confunden con panaceas, y a la vez enormes riesgos inherentes a su desarrollo. Hay peligros potenciales para la salud pública y la ecología, como una liberación accidental al ambiente de organismos transgénicos. Aunque los organismos modificados genéticamente permitirían reducir las actividades que deterioran el ambiente, como el uso intensivo de plaguicidas, también pueden conducir, en el largo plazo, a modificar de modo irreversible el equilibrio conservado hasta ahora en la naturaleza y cuyos efectos deteriorantes son difíciles de predecir.³²

Es poco probable que la biotecnología ayude a modificar las estructuras actuales, que han propiciado la creación de regiones favorecidas, menos favorecidas y francamente miserables. La magnitud y velocidad de la biorrevolución, como algunos gustan llamarla, puede aumentar las disparidades regionales. La política con que se ha pretendido generar excedentes exportables y ganancias de divisas para las economías nacionales ha terminado por proveer de alimentos baratos a los países desarrollados y por dejar en éstos las divisas generadas. En las condiciones actuales, el riesgo de la biotecnología es propiciar "más de lo mismo".³³ Se debe descartar la noción de que los principales factores para el desarrollo vendrán de fuera. El autodesarrollo podría ser una mejor forma de enfocar el problema. Esto no implica autarquía sino un proceso dinamizado por fuerzas propias en el que se adapten e incorporen las ideas y los recursos foráneos; las fuerzas del crecimiento provendrán de los procesos endógenos. Al parecer ningún país avanzado ha logrado consolidarse con irrestrictos flujos de inversión extranjera; siempre ha habido ahí núcleos endógenos de crecimiento.³⁴

Las formas de organización actuales han subordinado financiera y tecnológicamente a los países subdesarrollados, lo que tiende a ahondar las desigualdades. Llegaron a su fin las ventajas derivadas de la abundancia de mano de obra y la disponibilidad de materias primas. Los países industrializados cambian su condición

31. P. Joudrier, J.C. Autran y M.F. Gautier, "Pourquoi cloner les genes des protéines de réserve du blé", en *Biofutur*, vol. 5, 1987, p. 46.

32. A. Buckwell y A. Moxey, *op. cit.*

33. Véase P. Phillips, "What Biotechnology Can (But Won't) Develop", en *Trends in Biotechnology*, vol. 6, núm 12, 1988, p. 292.

34. Véase F. Rello, "Miseria del desarrollo", en *Nexos*, vol. 10, núm. 110, México, 1987, p. 65.

de importadores a exportadores de productos agropecuarios y mantienen su superioridad histórica en bienes de capital y diversos tipos de tecnologías. A ello contribuyeron las tecnologías agropecuarias que utilizaron de modo intensivo en los últimos decenios, a las cuales algunos autores incluyen ahora en el rubro genérico de biotecnología. La ciencia, acompañada en forma indisoluble de la tecnología, se ha incorporado ahí como una fuerza productiva. Esta pareja se ha concebido como uno de los principales motores del desarrollo.

En el caso de México, la modernización científica y tecnológica requiere elevadas inversiones tanto para la investigación fundamental como para la aplicación del conocimiento, ya que en el mundo actual una no puede concebirse sin la otra. Debe darse también mayor atención a la adecuada integración de las actividades agropecuarias y las de tipo industrial. Las características de la investigación y el tipo de desarrollo agroindustrial que el país requiere han de definirse tras considerar, entre otras condiciones, las extensas zonas montañosas, las sequías recurrentes, la devastación del trópico húmedo, la amplitud de la economía campesina y los numerosos grupos que padecen desnutrición crónica.

No debe sobreestimarse la biotecnología de punta sólo por serlo, pero tampoco conviene subestimarla; del mismo modo, no debe excluirse *a priori* a la biotecnología tradicional sólo porque no ejerce la fascinación de la primera, ya que es enorme su potencial debido a las características del país. Hay que erradicar para siempre los factores que relegaron a las biotecnologías nacionales. Cabe mencionar la que han practicado durante siglos los grupos indígenas del sureste mexicano: mediante una sencilla fermentación sólida de la masa de maíz se obtiene el pozol, producto con extraordinarias propiedades nutritivas que, por razones todavía difíciles de aceptar, no se ha rescatado.³⁵ Otro ejemplo notable es el amaranto, planta tolerante a la sequía y a varias enfermedades, originaria de Mesoamérica, con valor nutricional que, junto con la soya, se compara con el de la proteína de la leche. Sin embargo, no hay programas capaces de inducir su aprovechamiento racional para la alimentación de amplios sectores de la población; aquí la biotecnología puede desempeñar un papel preponderante.³⁶ Un último ejemplo se refiere a la nixtamalización. Pocos países pueden preciarse de haber creado un proceso tecnológico tan simple pero de tantas y positivas implicaciones nutritivas. Los tratamientos que se dan al maíz elevan su valor alimenticio, reducen factores indeseables y proporcionan calcio, sustancia vital presente sobre todo en los productos lácteos. Éstos, como se sabe, están fuera de las posibilidades de los más asiduos consumidores de tortillas. Por ello, debe rechazarse la tendencia impropia en estos grupos a sustituir la tortilla por el pan blanco, que por definición tiene menor calidad alimenticia.³⁷

Los programas de biotecnología que conciben los organismos nacionales encargados del desarrollo científico y tecnológico no

deberán excluir la formación de recursos humanos comprometidos con el entorno social y con la necesidad de contribuir al desarrollo de biotecnologías basadas en el ingenio local. No parece que los centros internacionales instalados en los países subdesarrollados sean la respuesta para éstos. Tales centros, que cuentan con infraestructuras del mundo industrializado, disponen de burocracias técnicas y científicas con altos sueldos que contrastan con los grupos de científicos nacionales con apoyos ínfimos. El eje central de la modernización deben constituirlo los grupos nacionales dedicados al quehacer científico-técnico en los centros universitarios y en el ramo productivo de los sectores público y privado. Sólo en forma complementaria es válido y deseable que algunos grupos internacionales, incluso de empresas transnacionales específicas, se sumen a esta tarea.

Para orientar estos programas, entre otras interrogantes que podrían considerarse, cabe mencionar:

- ¿Quiénes son los actores sociales que están desarrollando la biorrevolución y cuál es el entorno económico nacional y mundial en que lo hacen?

- ¿Quiénes tienen las mayores opciones de ser beneficiarios?

- ¿Qué se debe y se puede hacer en países como México para aprovechar las oportunidades de las biotecnologías tradicional y de punta para minimizar sus amenazas?

- ¿Qué se debe y se puede hacer para no tener más de lo mismo, como ocurrió con la revolución verde?

- ¿Cuándo cambiaremos la tendencia actual al continuo deterioro de los patrones alimentarios de los sectores sociales mayoritarios de México?

En las investigaciones sobre alimentación y biotecnología realizadas por el grupo de trabajo del autor,³⁸ se señalaron problemas específicos que con el tiempo han cobrado mayor importancia. Empero, no basta con determinar que los viejos problemas alimentarios de nuestras sociedades, que además se expanden y acrecientan, continúan aquejando principalmente a los habitantes de las pequeñas comunidades de América Latina y a los grupos que han ruralizado las zonas urbanas denominadas villas miseria en Argentina, favelas en Brasil, callampas en Chile, ciudades perdidas en México, barriadas en Perú y ranchos en Venezuela. Además, es imprescindible llevar a cabo acciones concretas que resuelvan el problema a la brevedad posible porque son irreversibles los daños causados por una alimentación deficiente. □

38. Véanse de Octavio Paredes López, "La biotecnología de plantas: una herramienta estratégica . . .", *op. cit.*; "El dominio de los países poderosos sobre los alimentos", en *Ciencia y Desarrollo*, año 2, núm. 12, México, 1977, p. 17; "La alimentación: ¿penuria social en América Latina", en *Interciencia*, vol. 3, núm. 5, Venezuela, 1978, p. 282; de Octavio Paredes López y Yoja Gallardo Navarro, "La industria alimentaria en México y la penetración de las empresas transnacionales" y "La alimentación en América Latina. Una mirada al pasado, el presente y el futuro", en *Comercio Exterior*, vols. 26 y 31, núms. 12 y 3, México, diciembre de 1976 y marzo de 1981, pp. 1421 y 247, respectivamente; y de Octavio Paredes López, J. Ibarra, Y. Gallardo y S. Sánchez, "Encuesta sobre los alimentos envasados a disposición del consumidor en la ciudad de México", en *Comercio Exterior*, vol. 25, núm. 10, México, octubre de 1975, p. 1156.

35. O.R. Cravioto, Y.O. Cravioto, G. Massieu y J. Guzmán, "El pozol, forma indígena de consumir el maíz en el sureste de México y su aporte de nutrientes a la dieta", en *Ciencia*, vol. 15, México, 1955, p. 27.

36. O. Paredes López, A.P. Barba de la Rosa, D. Hernández López y A. Cárabez Trejo, *Amaranto-características alimentarias y aprovechamiento agroindustrial*, OEA, Washington, 1990.

37. Véase Octavio Paredes López, "Maize. A Review of Tortilla Production Technology", en *Bakers Digest*, vol. 57, núm. 5, 1983, p. 6.