

Instituto de Estudios Sociales Avanzados (CSIC)

Documento de Trabajo 98-14

La biotecnología ante su espejo: sociedad, industria, desarrollo y medio ambiente**Tres imágenes (1997-1998)**[Emilio Muñoz](#)

Instituto de Estudios Sociales Avanzados (CSIC)

Este Documento de Trabajo constituye una novedad respecto a los anteriores del autor, puesto que recoge tres textos elaborados en 1997 y 1998 con distintos objetivos y para diferentes audiencias, aunque representan una continuación del hilo que se ha venido desarrollando como imágenes o reflejos de la biotecnología cuando se pone ante el espejo de su complejidad. Los textos recogidos y sus destinos son, respectivamente:

- [Nuevas Tecnologías y el Diálogo entre Sociedad e Industria. El Caso de la Biotecnología](#) (texto preparado como presentación de los problemas para el Curso *Ciencia, Tecnología y Sociedad*, organizado por la UNED; J. F. Tezanos, director), febrero de 1997.
- [Biotecnología y Desarrollo en Distintos Contextos Culturales. Influencias e Impactos](#) (texto para la publicación *Retos del tercer milenio. Ciencia, tecnología, cultura y desarrollo*, M. Medina y Teresa Kwiatkowska, coords.), septiembre de 1998.
- [Globalización y Perspectiva Tecnológica. Las Relaciones con el Medio Ambiente y las Nuevas Biotecnologías](#) (texto para la revista *Sostenible*, Cátedra Unesco en Tecnología, Desarrollo Sostenible y Cambio Global, J. Xercavins, director), septiembre de 1998.

**NUEVAS TECNOLOGÍAS Y EL DIÁLOGO ENTRE SOCIEDAD E INDUSTRIA:
EL CASO DE LA BIOTECNOLOGÍA**

El concepto de nuevas tecnologías surge en la sociedad postindustrial para abarcar aquellas tecnologías que están basadas en el conocimiento y que, de acuerdo con los economistas que estudian el cambio técnico, poseen el carácter de o se ajustan a trayectorias revolucionarias. Entre ellas se incluyen las tecnologías de la información y las comunicaciones, la microelectrónica y las tecnologías de la vida, aunque yo me inclinaría a incorporar también las tecnologías avanzadas del transporte.

Estamos en una sociedad tecnocientífica, en el marco de los países avanzados, pero esta situación coincide con un momento de profundo cambio ya que, precisamente en esas sociedades, han surgido y continúan evolucionando movimientos críticos ante la ciencia y la tecnología. Entre estos movimientos hay que citar las iniciativas Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS). Estas iniciativas aparecen en los Estados Unidos a principios de los años setenta como reflejo de la preocupación social ante las dudas que suscita el mito de los beneficios continuos del progreso científico y tecnológico. Esta orientación social encuentra un cauce cognitivo en el seno de un elevado número de instituciones académicas ya que un conjunto de universidades norteamericanas establecen programas docentes e investigadores apoyados además por las decisiones de la principal agencia pública norteamericana implicada en la financiación de la investigación. En efecto, la National Science Foundation decidió, a partir de los setenta, establecer unas líneas de financiación

para rescatar la importancia de la Ética y los Valores en el desarrollo científico y técnico y para promover los estudios sobre Historia y Filosofía de la Ciencia y la Técnica, lo que permitió asentar los trabajos académicos y analíticos sobre ciencia, tecnología y sociedad.

Estas aproximaciones llegan a Europa más tarde y circunscritas a ciertos países del centro y del norte como es el caso de los países nórdicos y de los Países Bajos. Entre ellos, cabe destacar a Dinamarca y Holanda por la intensidad de su interés y dedicación. España se incorpora más tarde a estas tendencias, aunque, como dato positivo, conviene señalar el establecimiento de una asignatura CTS en la educación secundaria y la puesta en marcha de ciertas actividades académicas y de investigación en diferentes universidades y en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

La evolución de estos movimientos muestra una tendencia a aumentar su relevancia. Considerados como marginales por la mayoría de los científicos experimentales de los países con mayor peso y tradición científica, como puede ser el caso de los Estados Unidos, su importancia ha crecido al convertirse en una base de argumentos de legitimación para las críticas sociales ante la ciencia y tecnología y en un soporte para la toma de decisiones restrictivas sobre la financiación de la investigación como cambio de tendencia a lo que ha venido ocurriendo durante los últimos cincuenta años. Ello ha determinado que se desencadenara lo que se ha dado en llamar la "Guerra de las Ciencias" como consecuencia de la reacción de los científicos experimentales ante lo que consideran ataques de los que se dedican a los estudios sociales de la ciencia. De esta "Guerra" se han hecho eco las revistas más conspicuas en la tradicional vía de difusión del conocimiento científico como es el caso de *Nature* (británica) y *Science* (norteamericana).

En el contexto de conflicto de la ciencia y la técnica con la sociedad, y en particular con las organizaciones defensoras del medio ambiente y con las organizaciones de consumidores, afloran otras iniciativas en los países avanzados, como puede ser el caso de los Estados Unidos y el Reino Unido, encaminadas a fomentar la culturización científica de los ciudadanos corrientes. El movimiento norteamericano se articula bajo el título "*Scientific Literacy*" mientras que el europeo se organiza bajo la temática del "*Public Understanding of Science and Technology*" del que hablaremos más adelante.

Definición y naturaleza de la biotecnología

La definición de la biotecnología no es una tarea fácil. Ha llegado a establecerse como convenio que la biotecnología es la tecnología que utiliza las "propiedades de los seres vivos para generar productos o modificar procesos, o modificar propiedades de los organismos -microorganismos, plantas o animales- con fines específicos y determinados".

La biotecnología es una tecnología ambivalente en lo que respecta al concepto de tecnología emergente, ya que en ella confluyen aplicaciones tecnológicas tan antiguas como el hombre, como es el caso de la transformación de alimentos -pan, cerveza, vino, productos lácteos- al recurrir a tecnologías tradicionales en la industria, como son los procesos de fermentación utilizados en la industria agroalimentaria y en la industria farmacéutica, con el empleo de las tecnologías más modernas derivadas del conocimiento de las bases de la información genética y de la capacidad para modificarla.

Desde el punto de vista económico tiene un carácter horizontal ya que sus objetivos abarcan todos y cada uno de los tradicionales sectores en que se divide la actividad económica, primario secundario y terciario. Desde el punto de vista geoestratégico, la biotecnología posee también un carácter polivalente ya que sirve los intereses de los países más avanzados, pero puede convertirse en instrumento estratégico para la consecución de nichos específicos en los países con un nivel intermedio y servir como plataforma de

despegue para países en vías de desarrollo. Se trata de una atractiva posibilidad bajo el prisma de la solidaridad y desde una nueva política de la cooperación pero sobre la que yo mantengo dudas acerca de la probabilidad a la vista de las ideologías que predominan basadas en el neoliberalismo y en la búsqueda a ultranza de los beneficios individuales.

En resumen, la biotecnología es una tecnología capacitadora, que utiliza las propiedades de los seres vivos para producir y transformar alimentos, para obtener sustancias con actividad terapéutica, para afrontar la solución de alteraciones en el medio ambiente. En unos casos utiliza las propiedades de los seres vivos tal como se encuentran en la naturaleza, lo que corresponde a la biotecnología antigua o clásica; en otros casos, acude a la modificación de las capacidades funcionales de los organismos por medio de la ingeniería genética para producir sustancias o mejorar procesos. Suelo acudir a la metáfora de la moda para señalar que la biotecnología permite obtener productos o alcanzar objetivos a la medida, de acuerdo con un diseño o patrón específico. Las tecnologías de la información producen, por el contrario, productos "prêt a porter".

Relaciones entre biotecnología y sociedad.

En atención a lo que se acaba de delinear, parece evidente reconocer que aproximarse a las relaciones entre biotecnología y sociedad es acercarse a la complejidad, quizá como paradigma de lo que ofrece el campo de los estudios Ciencia, Tecnología y Sociedad. Independiente del valor específico de estos estudios por cuanto suponen de marco conceptual para avanzar en la comprensión de la interdisciplinariedad, así como de referencia práctica para valorar las implicaciones reales de una nueva tecnología y sus aplicaciones, la biotecnología emerge como un instrumento adecuado para comprender las repercusiones socioeconómicas de las nuevas tecnologías en relación con el diálogo político y social.

La riqueza y diversidad propias de la biotecnología hacen extremadamente difícil abordar el estudio de estas relaciones de un modo genérico. Es conveniente aproximarse con una orientación mixta que combine el análisis de casos con una visión integradora. Debe examinarse, en cada caso la posición de las comunidades implicadas respecto a todos los aspectos -científico, tecnológico, económico y social- que comprenden los desarrollos tecnológicos.

En este proceso, los economistas estudiosos del cambio tecnológico han tratado de incluir el análisis de la biotecnología como modelo para avanzar en una nueva orientación epistémica. Los sociólogos intentan, por su parte, evaluar e interpretar las reacciones de las sociedades, sus posiciones y actitudes ante los usos de las nuevas tecnologías. Las comunidades científicas implicadas en el desarrollo de la biotecnología, se encuentran sometidas a un proceso de choque al experimentar cambios en los modos de producir conocimiento, que se asemeja más a un nuevo modo (véase M. Gibbons y cols., *The new production of knowledge*, Sage, 1994) basado en la interdisciplinariedad que al modo tradicional sustentado en las disciplinas, a la par que se ven conducidos a modificar sus pautas de valoración y reconocimiento, al agudizarse el conflicto entre lo básico y lo aplicado, mientras se revisan los patrones de difusión del conocimiento y se abren nuevas vías en la relación entre academia y empresa para acomodarse a exigencias diferentes. Las tomas de decisiones en lo que concierne a la biotecnología se hacen cada vez más complejas requiriendo ralentización en unos casos y aceleraciones en otros.

La influencia de los "lobbies" se acrecenta -como se ha visto en el papel de los agricultores en el caso de la directiva sobre patentes que se comentará posteriormente-, aunque, en numerosas ocasiones los intereses son contrapuestos por lo que esas influencias se neutralizan y se convierten en inoperantes por inoportunas y desacompañadas. En el curso

de estas relaciones surgen argumentos positivos y conflictivos a diferentes niveles y entre diferentes colectivos.

La relación satisfactoria

Un primer paso en la compleja relación entre biotecnología, industria o sociedad aparece en virtud del examen de ventajas o inconvenientes que entraña el tipo de aplicación que se lleva a cabo. Conviene mencionar, dentro de los ofrecimientos ventajosos, dos casos que nos presenta la industria farmacéutica. La hormona de crecimiento, un medicamento que se extraía de hipófisis de cadáveres con el consiguiente lado sombrío que su tráfico suponía y que llegó además a producir casos de enfermedad de Creutzfeld-Jacob por utilizar cadáveres que habían padecido la enfermedad, ha mejorado su accesibilidad y seguridad al obtenerse a partir de bacterias en las que se ha incorporado el gen humano responsable de su síntesis. La insulina se ha obtenido tradicionalmente a partir de páncreas de cerdo -un animal que muestra grandes semejanzas inmunológicas con el hombre- con el consiguiente problema de disponibilidad. Su obtención por ingeniería genética a partir de bacterias que incorporan el gen de la insulina humana ha supuesto indudables ventajas en la producción y en la disminución de las reacciones alérgicas.

Una relación ambivalente

Los ejemplos suministrados ponen de relieve que los microorganismos, las bacterias en particular, aparecen como un elemento apropiado para generar satisfacciones en la aplicación de la biotecnología. Esta verdad no es, sin embargo, absoluta, puesto que depende del espacio en que se utilicen tales microorganismos.

Existe una casi completa certeza respecto al uso amigable de los microorganismos, cuando se trabaja con ellos en espacios confinados, en el ámbito de los laboratorios. Esta seguridad se asienta en toda una serie de guías o directrices que se aplican en tales usos, ya que los laboratorios disponen de niveles de seguridad creciente en relación con el nivel igualmente creciente de riesgo de los organismos que se vayan a emplear. Es importante poner de relieve que los propios científicos contribuyeron a la elaboración y puesta en práctica de las medidas y elementos de control. Al descubrirse la posibilidad de manipular el material genético en los años 70, los científicos, encabezados por P. Berg líder en estas investigaciones y premio Nobel por ellas, se reunieron en una ciudad de California, Asilomar, y decidieron establecer una moratoria y contribuir al desarrollo de guías que permitieran controlar el riesgo. Veinticinco años después, se puede afirmar que no se ha producido ninguna situación catastrófica, lo que tiene su lado positivo, aunque también supone un cierto problema de exceso de confianza que conviene tener en cuenta y matizar cuando sea conveniente.

La situación es diferente cuando los microorganismos se diseminan en el medio en condiciones de libertad. Existe menos experiencia y más reducidos niveles de información acerca de lo que puede suponer la liberación de microorganismos modificados genéticamente en el exterior, al aire libre. Aunque se disponga de conocimiento sobre las propiedades y el comportamiento de los organismos, el aumento y complejidad de las variables que comportan este tipo de experimentación incrementa la incertidumbre sobre los resultados y los efectos de este tipo de ensayos.

En todo caso, la gravedad de las relaciones y reacciones ante la liberación de organismos genéticamente modificados puede variar según el uso a que se destinen: corrección de un problema medio ambiental o desarrollo de un producto agrícola. En el primer caso, cabe anticipar que la reacción será más favorable por cuanto los mayores críticos al empleo de estas prácticas se sitúan en el seno de las organizaciones defensoras del medio ambiente

que pueden estimar que el riesgo de esa liberación es menor que el coste de una catástrofe ecológica, como puede ser el desbordamiento de una carga de petróleo sobre el mar; pero es conveniente no olvidar en este ámbito que hay que promover la introducción de mecanismos de suicidio en los organismos que se liberan en el medio para corregir del desastre ecológico, con el fin de asegurar problemas secundarios, unos mecanismos que los científicos y técnicos han desarrollado y puesto en práctica con eficiencia. En el terreno de la agricultura la situación es más conflictiva como veremos a continuación.

En la cara negra de la historia, altamente improbable y donde ninguna relación es lícita, estaría el caso del eventual empleo de organismos para la guerra biológica. Quiero subrayar a este respecto, como ya he hecho en otras ocasiones, que la guerra biológica no requiere ni tiene conexión directa con la ingeniería genética. El horror de la guerra biológica puede darse recurriendo simplemente al arsenal de organismos patógenos, como puede ser el bacilo botulínico, con el que la evolución natural nos ha dispensado.

La relación conflictiva

En el terreno de las aplicaciones biotecnológicas en agricultura es donde se plantea la relación más conflictiva entre ciencia, industria y sociedad. Una serie de argumentos avalan este aserto. La producción agrícola es una producción más global donde el carácter de diseño que caracteriza a la biotecnología se difumina; no existe una clara conciencia de que los productos así obtenidos se encaminen a resolver un problema -como puede ser el caso de la salud o de la aplicación medio ambiental- por lo que parece que los intereses que predominan en el proceso son los intereses del capital y de las grandes empresas con lo que se abren fisuras para el ataque de las posiciones anti-biotecnología[1], además la biotecnología vegetal se ha desarrollado más tardíamente que la biotecnología microbiana e industrial por lo que dispone de menor base para comprender los problemas y las consecuencias que pueden derivarse de sus usos y aplicaciones.

Consecuentemente, la sociedad reclama a los gobiernos que evalúen los riesgos. Como he planteado en un trabajo previo (Muñoz, E., 1996) los riesgos ambientales y su relación con los beneficios deben contemplarse desde una triple perspectiva: biológica, política y psicosocial.

La principal causa de la controversia, y ello debe aceptarse por los científicos en la aplicación creciente de la "ética de la responsabilidad" que algunos preconizamos (véase Muñoz, E., 1997d), reside en el hecho de que los riesgos no son totalmente controlables. Es lógico que el público insista en demandar a los gobiernos que se detecten y evalúen tales riesgos antes de otorgar la aprobación para el desarrollo y comercialización de los productos biotecnológicos agrícolas. Las políticas pueden ejercerse por la vía de la regulación, estableciendo condiciones previas para reducir la intensidad o la probabilidad de un evento, o por la vía judicial que examina las consecuencias de tales eventos y busca el castigo de la negligencia procurando compensar las víctimas o restaurar los daños causados. En cualquier caso, es necesario reconocer la importancia de la información como elemento decisivo para la puesta en práctica de políticas orientadas a evaluar y gestionar los riesgos, de modo que queden claras las condiciones en que se mueven los científicos que trabajan en el campo de la experimentación y buscan la conexión con las empresas, las firmas que inviertan en agricultura biotecnológica y las agencias que regulan y financian estas iniciativas. El acceso a la información es tan básico para proporcionar confianza social y económica como lo es disponer de datos científicos significativos y fiables. La información debe ser accesible para todos los interesados y presentada de forma comprensible y dentro del contexto apropiado.

Conflicto entre científicos

Un análisis en el que vengo insistiendo desde hace un cierto tiempo al hilo de las reflexiones sobre Ética en el marco de la investigación y el desarrollo (véase las referencias anteriores), pone de manifiesto que una de las razones de la complicada relación entre biotecnología y agricultura tiene sus raíces en el conflicto entre dos colectivos científicos: los ecólogos se enfrentan a los biólogos moleculares en la búsqueda de su reconocimiento y en la defensa de la visión holística frente a la reduccionista. Los primeros colocan a los segundos ante el maniqueísmo de la separación entre "buenos" y "malos". Los ecólogos, con matices, se ubican en el lado "bueno". Aún reconociendo que la biotecnología puede ser positiva, subrayan -lo que es cierto- que el riesgo nunca es nulo y señalan a este respecto los efectos nocivos que se han derivado de la implantación de animales y plantas en territorios ocupados. Los científicos defensores de la biotecnología -que corresponden a los que han desarrollado las disciplinas que desde la microbiología a la biología molecular (véase Figura en E. Muñoz, 1996) han contribuido a la revolución biológica de esta última media centuria- arguyen que las mayores cosechas de Norteamérica, desde el arroz a la soja, son productos que proceden de fuera y han sido objeto de manipulación, y yo subrayo que los principales productos agrícolas europeos como la patata y el tomate proceden igualmente de fuera: el origen de la patata se sitúa en los Andes peruanos-bolivianos, el tomate procede de Sudamérica y se introdujo en Europa procedente de México en la primera mitad del siglo XVI. No se trata, por lo tanto, de plantas indígenas, sino de elementos ajenos que han generado efectos y resultados beneficiosos a través de un proceso de ensayo y error, metodología característica del proceso científico. El problema radica en contemplar si estamos dispuestos, a través de un constructivo diálogo social, a reconocer las virtudes de esta metodología. En el conflicto entre los científicos pro-biotecnología y los anti-biotecnología cada grupo ha tomado posiciones distintas respecto a las analogías. Los ecólogos consideran que predomina la analogía de la naturaleza bromista que obedecería a la ley de Murphy -todo lo que puede ir a peor, irá-, mientras que para los científicos probiotecnología la naturaleza responde a leyes, a regularidades. Los primeros recurren a casos extremos; los segundos citan principios.

Es evidente que los expertos tienen un papel decisivo en los asuntos científico-técnicos, aunque en estos últimos tiempos ese papel empieza a ser escrutado con suma atención al haber actuado aparentemente con sesgos o intereses particulares en lugar de la defensa de lo universal como exigiría la aproximación altruista en el comportamiento de esos actores, como revelan el caso de las "vacas locas" o de la "oveja clónica". De ahí la necesidad de que la institución científica se relacione de modo creciente con la sociedad y la política, en lugar de seguir anclada en las tradicionales pautas de actuación de los científicos proclives a dirimir entre ellos sus intereses y conflictos y a otorgar internamente recompensas y castigos. Estos procesos sirven para poner de manifiesto la importancia de instancias intermedias, dedicadas a la evaluación social y económica de tecnologías combinando conocimiento científico y soporte político, como ha sido el caso de la norteamericana Office of Technology Assessment (OTA), la holandesa NOTA, y las oficinas parlamentarias europeas (STOA) y francesa. Estas agencias están siendo barridas o azotadas por las fuertes corrientes neoliberales. La OTA señaló en su momento, al hilo del debate entre científicos a que he hecho referencia, que "no hay método científico incontestable que pueda dictar cual es la analogía útil y aceptable".

Regulaciones

En la Introducción al libro *Genes en el Estrado* (CSIC, 1996), Daniel Borrillo ha desarrollado las independencias y relaciones entre ciencia y derecho. La delimitación de áreas de competencia y acción que tuvo lugar a lo largo del siglo XIX llevó a configurar la separación entre un "Derecho para los ciudadanos, ya que sus conductas respondían a actos sociales, y un no-Derecho para los científicos, en tanto que tales, pues sus conductas respondían a hechos científicos. De alguna manera sucede con la ciencia con lo que ya había sucedido con la economía. El Orden Jurídico no consideraba la actividad económica como

susceptible de regulación; la ley del mercado sustituía a las leyes de los hombres y toda regulación de la actividad económica se consideraba perturbadora en un desarrollo sano de la producción. Hoy día resulta difícil aceptar este argumento ya que se puede comprobar que incluso las empresas más liberales no pueden prescindir de la regulación y el control y hasta se ha llegado a constituir como disciplina jurídica un Derecho económico".

Sigue Borrillo, las ideas del científico como prototipo del hombre libre que darían sentido al racional de que la ciencia no confiere poder sino que simplemente reconoce hechos, llevaron al Orden Jurídico a considerar que nada tenía que hacer en una actividad en apariencia desposeída de móvil político y dirigida siempre hacia fines benéficos. Sin embargo, la realidad llevó al jurista a moderar esta visión paradigmática, sobre todo tras la segunda guerra mundial. Las tomas de conciencia de aspectos negativos en el desarrollo del conocimiento científico y el cuestionamiento de la noción tradicional de la ciencia (véase Introducción) ha supuesto que la ciencia y la técnica, en tanto que procesos socio-culturales, puedan estar sujetas a mecanismos de negociación.

Borrillo establece una declaración que me parece muy importante y cito de nuevo textualmente "La regulación de la actividad científica implica en última instancia su definitiva institucionalización, vale decir, su inserción en el orden general del entramado social...lo científicamente verdadero podrá coincidir, o no, con lo socialmente útil, con lo económicamente rentable, con lo éticamente deseable, con lo humanamente admisible, con lo internacionalmente posible, con lo políticamente realizable, etc. Es en ese espacio, y sólo en él, donde los conflictos pueden dirimirse en el proceso de negociación jurídica".

Una parte muy importante de la regulación sobre la actividad biotecnológica descansa en el *principio de precaución o de prudencia* que, en opinión de los expertos (véase artículo de D. Borrillo en el libro *Genes en el Estrado* que él mismo ha editado, CSIC, 1996 y referencias allí señaladas), obliga a examinar los niveles de protección y de riesgos. La prudencia consiste en la moderación en el comportamiento para ajustarlo a lo que es sensato, discreto o exento de peligro; significa, en última instancia, cautela, reserva y discreción. Todo ello supone la modificación de la "cultura del riesgo" que tenía en cuenta a éste siempre en último término o como consecuencia. La noción clásica de riesgo implicaba a los productos peligrosos en lugar de las técnicas o procesos peligrosos. De acuerdo con esta concepción, no existen razones para someter a regulación la ingeniería genética como actividad peligrosa en sí. Las principales objeciones de científicos e industriales se fundan en este argumento ya que no existirían razones para condenar una actividad que no ha mostrado peligrosidad particular (véase anteriormente).

Sin embargo, las Directivas europeas sobre organismos genéticamente modificados (90/219 y 90/220) han invertido esta lógica, procurando regular antes que el peligro emerja. El proceso de incorporación de estas Directivas en distintos países de la Unión Europea ha sido objeto de un proyecto de investigación que ha puesto de relieve interesantes diferencias culturales y políticas entre los países (número de junio 1996 de la revista *Science and Public Policy*). En estas Directivas se marcan las orientaciones para la puesta en marcha de la Autoridad Competente que debe decidir sobre las experiencias dentro de los países. Estas Directivas han sido revisadas recientemente.

El debate sobre los alimentos modificados genéticamente ha sido también muy intenso en el seno de la Unión Europea y que se ha saldado con la aprobación de una Directiva 258/97, pendiente todavía de publicación, que parece reconocer la necesidad de etiquetado cuando el producto alimentario procede directamente del material transformado -tal sería el caso de un tomate transgénico- pero obvia la necesidad de etiqueta cuando el producto que va al consumo es un intermediario- como sería el caso de un aceite procedente de una semilla transformada o de un vinagre procedente de un vino que se ha originado a partir de

uvas modificadas. Las razones técnicas que subyacen en esta propuesta son indudablemente sustantivas.

Es importante recordar en torno a este discurso las diferencias culturales entre sectores respecto a los problemas de regulación, con un sector tradicionalmente poco regulado como es el de la agricultura y otro habituado a las normas y a la regulación como es el que atañe a la salud. En este contexto, es palpable que la relación entre biotecnología en la industria farmacéutica y la sociedad está mucho más definida. En ella, el conflicto entre científicos está más matizado, a la par que la industria está acostumbrada al riesgo y a la regulación.

Patentes y biotecnología

El derecho de patentes, junto con el registro de marcas y los derechos sobre la copia, son un área importante de la legislación para la protección de la propiedad intelectual. Las leyes sobre patentes ofrecen protección a las invenciones que demuestran poseer las características de novedad, no-obviedad, utilidad y publicación. La concesión de una patente confiere al titular un derecho civil que impide a terceros explotar lo que está protegido por la patente, quedando excluido su uso para llevar a cabo investigaciones científicas. No permite al titular que explote él mismo su invención -debiendo acatar las regulaciones nacionales respecto al uso de la invención-, ni derechos sobre la propiedad de los materiales patentados.

Las patentes en la Unión Europea se pueden obtener tanto en las oficinas de patentes nacionales como en la Oficina Europea de Patentes (OEP) con sede en Munich. La protección de patentes para una empresa norteamericana o japonesa en sus mercados internos afecta a su capacidad para competir en otros mercados.

Se están llevando a cabo esfuerzos para armonizar la legislación y la práctica internacional en materia de patentes. Los Estados Unidos otorgan un período de gracia de un año entre la publicación de una invención y la fecha límite para presentar la solicitud de una patente norteamericana. En la mayoría de los países europeos, sin embargo, la revelación pública de una invención antes de presentar la solicitud de patente suele ser negativa. En el derecho norteamericano de patentes el término invención significa tanto invención como descubrimiento, mientras que en el derecho europeo se distingue descubrimiento, que es impatentable, de invención. Esta distinción no es fácil de aplicar.

Las sustancias naturales que integran mezclas complejas se pueden patentar cuando se aíslan de su medio natural, se identifican y son puestas a disposición, así como ocurre con el proceso que se desarrolle para producirlas de forma que se empleen con fines de utilidad. Corresponde tanto a sustancias inanimadas como a materiales vivos que son considerados por la OEP como invenciones.

Las *patentes de microorganismos* se conceden de modo rutinario por las Oficinas de Patentes de los tres grandes bloques. Esta situación es el fruto de un proceso de largo alcance que experimenta su punto de inflexión en 1980 con motivo del caso Chakrabarty cuando la Corte Suprema norteamericana estimó que no existía obstáculo para patentar un microorganismo -una bacteria del género *Pseudomonas* que fue manipulada para permitir la descomposición de hidrocarburos y ser más útil en la dispersión de manchas de petróleo-. Esta decisión ha influido en la mayoría de los países desarrollados y se ha incorporado en la legislación.

Las *patentes de plantas* ofrecen una situación más confusa. Las diferencias entre Europa y Estados Unidos, donde coexisten varios sistemas de protección de plantas, son cada vez

mayores. En Estado Unidos hay tres sistemas de protección: las variedades vegetales y las semillas de reproducción sexual pueden ser protegidas por el *Plant Variety Protection Certificate* equivalente al europeo Certificado de Obtención Vegetal -régimen especial para la protección de plantas que en 1970 por medio de la Convención sobre la Patente Europea descartaba conceder patente europea a las variedades vegetales y a los procedimientos, esencialmente biológicos, de obtención de vegetales. Por otro lado, la *Plant Patent* protege las nuevas plantas de reproducción asexuada que presentan alguna característica distintiva respecto a las plantas conocidas. y sobre todo, las plantas, incluidas las transgénicas, son susceptibles de protección por la *Utility Patent* (patente de invención) si se cumplen los criterios de patentabilidad.

En Europa, durante veinte años, el derecho sobre obtenciones vegetales demostró ser satisfactorio para proteger las plantas procedentes de la selección tradicional. Pero empezó a mostrar sus limitaciones cuando llegó la explosión de la genética de los vegetales a principios de 1980. El certificado de obtención vegetal (COV), derivado de la Convención UPOV (Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales), no es muy generoso, se aplica a las obtenciones vegetales pero deja fuera cualquier invención. El poseedor de un COV dispone del derecho de producir material de multiplicación con fines comerciales, pero este monopolio queda restringido por el principio del libre acceso a los recursos genéticos: el obtenedor no puede prohibir el empleo de una variedad y, aún menos, puede prohibir la comercialización de esta nueva variedad.

Los laboratorios europeos que trabajan en genética de plantas detectaron estas insuficiencias y trataron de ampliar las reivindicaciones de patente a las plantas genéticamente transformadas. La protección que aporta la patente es muy superior a la que confiere el COV, ya que permite prohibir a terceros cualquier otra forma de utilización del producto patentado: A priori, las plantas y las invenciones relativas a ellas pueden cumplir la mayor parte de las condiciones de concesión de una patente: novedad, actividad inventiva y carácter industrial. Pero está limitado por el principio de no patentabilidad de "variedades vegetales" inscrito en la convención sobre la patente europea.

Por lo tanto, mientras que Estados Unidos dispone de tres sistemas de protección de las plantas, Europa no puede protegerse y debe contentarse con patentar células vegetales transformadas como protección en materia de cultivo celular. La Convención de la UPOV ha sido revisada en 1991 y ahora no impide una doble protección para productores o patentes. Esta revisión está a la espera de ser ratificada por los Estados Miembros por lo que aún no está en vigor.

Las *razas de animales* producidas por métodos tradicionales no disponen de un sistema de protección comparable al de los derechos del cultivador de plantas. El Comisionado de Patentes de los Estados Unidos declaró en 1987 que se podrían conceder patentes norteamericanas para "organismos multicelulares vivos surgidos de manera no natural y no humanos, incluidos los animales". La primera patente de animal transgénico fue concedida en 1988 a la Universidad de Harvard para proteger al "onco-ratón". Tras un rechazo inicial por parte de la OEP a conceder la patente europea -y el éxito de una demanda ante la Corte de Apelación- dicha patente fue aceptada. Ante ello y lo que puede suponer se oponen los grupos anti-vivisección y de defensa de derechos de los animales. Se ha registrado un número elevado de solicitudes de patentes para animales transgénicos, pero se han concedido sólo unas pocas.

Las *patentes de genes* son factibles en todos los campos de la biotecnología: secuencias de nucleótidos que codifican para proteínas, vectores, microorganismos o organismo superiores transformados por la secuencia y hasta los productos cuando el producto es nuevo por sí mismo. La correspondiente tecnología del proceso también puede ser

protegida. La patentabilidad de secuencias de ADN de función desconocida es dudosa y controvertida. La organización HUGO (Organización del Genoma Humano) acepta que las patentes se concedan a los genes en su extensión, pero rechaza patentar secuencias fragmentarias de ADN que no tengan una utilidad o función establecida.

El debate entre patentes y biotecnología

Los grupos sociales preocupados por la ecología, los derechos y el bienestar de los animales, aspectos morales, y los intereses de pequeños granjeros y de los países en desarrollo se oponen a que existan patentes europeas bajo el principio general de que "patentar la vida" es anti-ético. La oposición surge también de los intereses de la industria agrícola tradicional europea, un importante "lobby", que considera que la biotecnología generaría cambios estructurales profundos con el monopolio de las grandes compañías de los derechos legales sobre los avances que se produzcan.

Todo ello está generando una situación de desarme jurídico en la Unión Europea ya que desde 1988 hasta 1997 se está llevando a cabo un esfuerzo, sin éxito, por parte de la Comisión Europea para establecer una Directiva que armonice las leyes de patentes nacionales con la Convención de la Patente Europea y que ofrezca una interpretación legal uniforme sobre algunos puntos de especial relevancia para los sistemas vivientes.

Una versión revisada de la propuesta de la Directiva ha sido sometida al Parlamento Europeo y se encuentra en el invierno de 1997 en un nuevo debate parlamentario cuyo resultado final es imprevisible[2].

Percepción social y biotecnología

Esta orientación metodológica se está convirtiendo en el instrumento de convergencia para intentar cerrar los debates entre colectivos y para establecer indicadores y puntos de referencia sobre las relaciones entre biotecnología, industria, expertos y sociedad.

Recoge y explota los planteamientos de las iniciativas *Scientific Literacy* y *Public Understanding* a las que nos hemos referido. Por ello empieza a incorporarse como una línea de investigación en los grandes proyectos sobre Biotecnología y Genética Humana. El Proyecto Genoma Humano financiado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos ha fijado un porcentaje de los recursos para financiar investigaciones sobre las repercusiones éticas, legales y sociales de los avances que el Proyecto consiga, lo que se agrupa bajo el acrónimo ELSI (Ethical, Legal, Social Impacts).

Los programas europeos que, dentro del Programa Marco, tienen que ver con la biotecnología en relación con la salud, la industria farmacéutica o agroalimentaria han marcado asimismo una línea de actividades horizontales bajo el epígrafe ELSA (Ethical, Legal, Social Aspects). Esta actividad de la Unión Europea financia un grupo de trabajo sobre Percepción Pública (*Task Group on Public Understanding*) que colabora con la Federación Europea de Biotecnología para realizar estudios y documentos divulgativos que ayuden a aumentar la cultura biotecnológica en Europa.

Es importante destacar que en España se viene observando una tendencia positiva en la constitución y evolución de grupos que trabajan sobre estas cuestiones. Entre ellos cabe mencionar a la Universidad de Educación a Distancia con su Departamento de Sociología II (Estructura y Procesos Sociales), la Universidad Autónoma de Barcelona (Departamento de Sociología), la Fundación BBV y su Centro Ciencia, Tecnología y Sociedad, la Fundación Valenciana de Estudios Avanzados en colaboración con otras instituciones -INVESCIT de las Universidades valencianas y Fundación BBV ya mencionada-, el Instituto de Estudios

Sociales Avanzados del CSIC, la Fundación CEFI (Centro de Estudios para el Fomento de la Investigación) que ha puesto en marcha en 1996 el *Gabinete de Biotecnología* (GABIOTEC) que me honro en presidir.

Una última referencia a un instrumento metodológico que se viene aplicando en ciertos países, Dinamarca, Holanda, Noruega, Reino Unido, para avanzar en la relación entre biotecnología y sociedad. Se trata de las "conferencias de consenso" en las que un panel de ciudadanos se encarga de transmitir a la sociedad en general, los problemas que suscita la biotecnología y que les son transmitidos por grupos de expertos. La intermediación del grupo de ciudadanos permite llegar a conclusiones consensuadas. Un análisis apresurado y limitado de los resultados de esas conferencias me permite aventurar la conclusión de que los resultados que se obtienen son en esencia, un reflejo de las sociedades en que se efectúan. Pero todo ello requiere ulterior reflexión y análisis cuando las iniciativas de este tipo proliferen. ▲

BIOTECNOLOGÍA Y DESARROLLO EN DISTINTOS CONTEXTOS CULTURALES: INFLUENCIAS E IMPACTOS

Al abordar la relación entre ciencia, tecnología y desarrollo en el marco de los retos con que afrontamos el tercer milenio, parece indispensable recurrir al ejemplo de la biotecnología, ya que nos ofrece, por sus características intrínsecas, el ejemplo de unas tecnologías de un amplio recorrido histórico con su origen en los albores de la humanidad -no podemos olvidar que la elaboración del pan y del vino son procesos biotecnológicos- mientras que han experimentado, y siguen experimentando, un profundo cambio con los enormes avances en el ámbito de la biología y con el advenimiento de técnicas como la ingeniería genética y la fusión celular.

En el inicio de los ochenta, la biotecnología fue recibida como el análogo biológico de la industria de los computadores (Callan, 1997). Ese mensaje se basaba en el reconocimiento de que la biotecnología es un campo de aplicación muy intensivo en conocimiento, que requiere un gran esfuerzo en investigación, al que se incorporan los inversores con una gran aplicación y que generó una nueva forma de actuación de los investigadores, que empezaban a reconocer el potencial económico y productivo de sus avances en el conocimiento, promoviendo la creación de empresas.

Otro hecho característico de la biotecnología es que el desarrollo espectacular de la llamada moderna biotecnología, que ha ocupado las dos últimas décadas, muestra una amplia relación con los contextos culturales (Callan, 1997). Al atraer la atención del mundo desarrollado, surgieron inmediatamente una serie de análisis comparados acerca de los modos de desarrollo entre los Estados Unidos, Japón y Europa, la conexión entre conocimiento y sus aplicaciones y la capacidad competitiva de las empresas en los distintos contextos económicos, geográficos y sociales. En contra de las previsiones iniciales que anticipaban que los japoneses iban a superar a los Estados Unidos en virtud de la tradicional capacidad productiva, imitativa y de mejora de los procesos de los asiáticos, los Estados Unidos siguen siendo los líderes mundiales en el ámbito de la biotecnología. Las razones principales de esta posición de privilegio de los norteamericanos descansan en el hecho de que la biotecnología y sus avances son todavía profundamente dependientes de la investigación y de la identificación de las funciones celulares y moleculares básicas. La cultura norteamericana capitaliza además perfectamente la relación entre el sector público y privado, a partir del gran apoyo público a la investigación biológica relacionada con los sectores agrícolas y sanitarios. Los científicos americanos han estado en la vanguardia de los procesos de transferencia de tecnología desde los laboratorios universitarios y hacia el

sector privado.

La situación es muy diferente en Japón, donde las ciencias biológicas han sido financiadas de modo insuficiente, lo que ha supuesto que el desarrollo de la industria japonesa se haya hecho al margen de la actividad académica en el dominio de la moderna biología.

Europa posee un entorno institucional intermedio entre el de los Estados Unidos y el de Japón, aunque la generalización en Europa no siempre es fácil, sobre todo si nos atenemos a la diversidad nacional y regional que caracteriza a los países de la Unión Europea. Este contexto diverso no oculta el problema general y común de lo que se ha venido en llamar la *paradoja europea*. Europa figura en cabeza en la producción de conocimiento, o comparte esta posición con Estados Unidos –particularmente en el caso del Reino Unido, Francia y Alemania- pero presenta notables déficits en la capacidad para difundir ese conocimiento hacia las empresas y para alcanzar consiguientemente un adecuado nivel de competitividad de sus firmas.

Por otro lado, la biotecnología está también en el centro del debate sobre las posibilidades que ofrece como tecnología en relación con el tercer mundo, en cuanto solución o problema a las dificultades con que se enfrentan los países y sociedades menos desarrolladas. Algunos autores, defensores de la biotecnología, arguyen que las tecnologías de lo vivo son mucho más propias para resolver cuestiones críticas que afectan al mundo en desarrollo, mientras que los detractores de esa(s) tecnología(s) acusan de falacia y oportunismo a los que realizan tales aseveraciones.

Cultura, sostenibilidad y progreso

Este debate específico en lo que concierne a la biotecnología, hay que situarlo en la confrontación entre las raíces sociales e históricas del progreso tecnológico y la influencia ideológica del concepto de progreso respecto a otros dos conceptos fundamentales en el mundo actual, como son la sostenibilidad ambiental y la social. La noción de progreso, occidental, optimista o ilusionante, ha sido aceptada en las sociedades modernas hasta el punto de constituir una "cultura del progreso", que se caracteriza por la correlación entre avance social y avance tecnológico, por lo que las naciones del tercer mundo tratan de modernizarse, no sólo para mejorar la situación material sino para alcanzar una creciente aceptación internacional, una mayor respetabilidad cultural. Las sociedades occidentales engloban también, y de modo creciente, posiciones críticas respecto a la tecnología, unas perspectivas que comparten con las dudas acerca de las "supuestas ventajas" del desarrollo de tecnologías no evaluadas socialmente (Chafy, 1997).

Parece que la modernización puede llevar consigo la corrección de las condiciones de pobreza, una sanidad mejor, la consecución de mayores cotas de bienestar material y, en general, una mejoría en la calidad de vida de los ciudadanos del tercer mundo. Sin embargo, los esfuerzos de modernización no han dado resultados positivos en muchos casos, ya que, en muchas ocasiones, los procesos de modernización se han llevado a cabo a expensas de las culturas tradicionales.

La sostenibilidad del desarrollo tecnológico es un tema sin duda problemático, aunque empiece a ser reconocido como una necesidad para una determinada ala de los defensores del progreso y de la influencia que sobre éste ejercen la ciencia y la tecnología. Jonathan Lash, Presidente del World Resources Institute, define el desarrollo sostenible como "la integración de los objetivos económicos, ambientales y sociales" (Lash, 1997, en el prólogo del libro *Frontiers of sustainability*). Se trata, por lo tanto, de una cuestión práctica que persigue la minimización de los conflictos entre esos objetivos y la elección de opciones cuando los conflictos son inexcusables.

Es indudable que el concepto de sostenibilidad se encuentra en el centro de un debate dentro del ámbito del discurso público, pero se ha convertido al mismo tiempo, en un elemento básico para los objetivos de muchos actores sociales, desde los políticos y partidos políticos, hasta las organizaciones no gubernamentales, que han tratado de incorporarlo a sus programas de acción.

Tres son las aproximaciones fundamentales para la incorporación del término sostenibilidad al discurso socio-político. Cada una de ellas revela el predominio de una determinada orientación disciplinar y es, por ello, un indicador de los diferentes elementos culturales que impregnan su génesis y evolución.

La primera aproximación es de naturaleza económica y se corresponde con una adaptación de la economía neoclásica a las preocupaciones ambientales desde la óptica del libre mercado. La segunda aproximación deriva de la orientación biológica y ecológica que trata de describir la relación entre el uso de los recursos renovables –su extracción, explotación y alteración por la contaminación ambiental- y el daño –o su evitación- de la integridad de los ecosistemas.

El tercer terreno de la aproximación cultural al tema de la sostenibilidad es el que ocupan los ecologistas que han configurado el marco moral y ético que cubre las relaciones entre el hombre y la naturaleza.

Biología: definición y relación con la sostenibilidad

La biología viene definida por un conjunto de tecnologías de carácter horizontal que abarcan una serie de técnicas derivadas de o relacionadas con la biología molecular, que utiliza las propiedades de los seres vivos, o de algunos de sus componentes, para desarrollar nuevos procesos industriales, bienes o servicios (Muñoz, 1997a y b).

Las referidas técnicas relacionadas con la biología molecular –recombinación del material genético, fusión celular, reacción en cadena de la polimerasa- permiten llevar a cabo una ingeniería de los genes en el conjunto de los seres vivos –microorganismos, plantas, animales- con el fin de expresar caracteres con utilidad reconocida.

La biología es una tecnología crítica para la sostenibilidad de la conservación del medio ambiente, por lo que se encuentra en el centro de un debate social. Desde el principio de las nuevas aplicaciones y usos relacionados con la manipulación de genes, la biología ha estado inmersa en una atmósfera cubierta de temores y sospechas. La novedad de los transgénicos ha supuesto que existieran dificultades para determinar los efectos que tales organismos pueden tener sobre la estabilidad ecológica o sobre la salud del hombre y de los animales. Los proponentes de la biología argumentan que esta tecnología puede ayudar a reducir el empleo de herbicidas o plaguicidas –al conseguir plantas resistentes o al obtener plantas dotadas de mecanismos de defensa contra insectos o plagas, contribuirá así a aumentar la productividad del suelo agrícola y a la utilización de zonas degradadas o con condiciones atmosféricas desfavorables. Los detractores argumentan, por el contrario, que el uso de organismos genéticamente modificados puede estar en el origen de alteraciones en el medio de consecuencias imprevisibles (Muñoz, 1997 b).

Es preciso señalar además que la biología depende de recursos naturales y de materias primas, puesto que el punto de origen para su actuación es siempre un organismo vivo natural, mientras que en muchos procesos debe utilizar materias primas para su transformación. En este contexto, la posición de la biología es también ambivalente y permite la adopción de posiciones favorables o desfavorables frente a sus usos en relación

con la conservación de los recursos naturales, según las visiones optimistas o negativas de índole cultural en la que se posicionen los actores.

Con este esquema expositivo, parece evidente que la complejidad de la problemática que plantea la biotecnología es muy grande. Por ello, he venido proponiendo que el tratamiento global de las consecuencias de la biotecnología desde un punto de vista cultural sobre las repercusiones sociales y económicas de sus consecuencias se atenga a una aproximación más diversificada, recurriendo al análisis de casos y de problemas específicos (Muñoz, 1997 c).

He defendido asimismo que la biotecnología no debe considerarse como una tecnología revolucionaria, sino que posee características que permiten considerarla como tecnología evolutiva y que, por lo tanto, será capaz de combinar, en un mecanismo adaptativo, su base científica y técnica con la relevancia de los entornos para conseguir nuevos logros, productos o procesos (Muñoz, 1997a) .

Desgranaré a continuación algunos casos o ejemplos que ponen de relieve la virtualidad de estas aproximaciones. Revelan al mismo tiempo las grandes posibilidades de los usos y aplicaciones de la biotecnología, mientras que dan fuerza a los argumentos que subrayan las limitaciones de un discurso apocalíptico de carácter general sobre los usos de la biotecnología, así como de la asunción de que las tecnologías de lo vivo son revolucionarias.

Los organismos extremófilos

El interés de la industria por encontrar enzimas, los catalizadores biológicos, que resistan condiciones ambientales extremas –temperatura, acidez o alcalinidad- ha incrementado la búsqueda de organismos extremófilos (Madigan y Marrs, 1997). Estos organismos, microorganismos fundamentalmente, son capaces de vivir en ambientes prohibitivos para el ser humano. No sólo toleran esas situaciones límites, sino que necesitan las condiciones extremas para que su supervivencia y multiplicación sea posible.

La tecnología enzimática es una de las tecnologías básicas de la biotecnología –el gasto mundial en enzimas se cifra en varios miles de millones de dólares anuales-; esos catalizadores se utilizan en una gran variedad de procesos que van desde la producción de sustancias edulcorantes y pantalones tejanos descoloridos hasta el diagnóstico de enfermedades infecciosas y genéticas, pasando por la identificación de criminales. Estos procesos además de buscar la rentabilidad industrial y económica, buscan la reducción de los costes sobre el medio ambiente, al disminuir el uso de productos químicos contaminantes. Sin embargo, los enzimas habituales dejan de funcionar cuando se exponen a altas temperaturas o a otras condiciones extremas. Los enzimas de los extremófilos son funcionales en condiciones en que los otros no lo son; por consiguiente, su utilización podría incrementar el rendimiento de los procesos industriales, reducir su coste económico y seguir mejorando las condiciones del medio ambiente.

Por otro lado, la búsqueda de organismos extremófilos tiene un doble valor: abre la posibilidad de nuevos procesos industriales a través de la tecnología enzimática y, por otro lado, aumenta el conocimiento de la diversidad biológica, a la par que puede estimular el potencial desarrollo de países o zonas geográficas que dispongan de ambientes de gran interés. Hay unas dos docenas de grupos de investigación que en varios países –Estados Unidos, Japón, Alemania entre otros- realizan prospecciones para aislar microorganismos extremófilos.

Entre ellos, los hay con diferentes requerimientos: unos son termófilos, se desarrollan a

temperaturas superiores a los 45° C, con un amplio rango pues se han encontrado ejemplos –como es el caso de *Pyrolobus fumarii*– que crece mejor con temperaturas de 105° C, pudiendo resistir hasta los 113°C (De Long, 1998). Otros microorganismos prefieren el frío - en océanos cuya temperatura media oscila entre uno y tres grados centígrados se están encontrando una gran cantidad de microorganismos-, como es el caso de *Polaromonas vacuolata* con una temperatura óptima de crecimiento de 4° C, siendo incapaz de multiplicarse por encima de 12° C. Otros extremófilos que son objeto de estudio son los que medran en medios ácidos o alcalinos –los acidófilos viven en los hábitats poco frecuentes que presentan un pH inferior a cinco, mientras que los alcalófilos prefieren un pH superior a nueve.

Los entornos con un pH muy ácido se originan de forma natural a partir de actividades como la producción de gases sulfurosos en fuentes hidrotermales y en ciertos tipos de géisers; son también creados por la propia actividad metabólica de los acidófilos. Los usos de enzimas procedentes de organismos acidófilos son un claro ejemplo de la mezcla de intereses que tienen raíces culturales y persiguen la sostenibilidad. Se usan como catalizadores para la síntesis de compuestos en condiciones ácidas y se emplean como aditivos en los piensos para animales, ya que mejoran la capacidad de digerir semillas de bajo coste, haciendo innecesario el recurso a alimentos más caros.

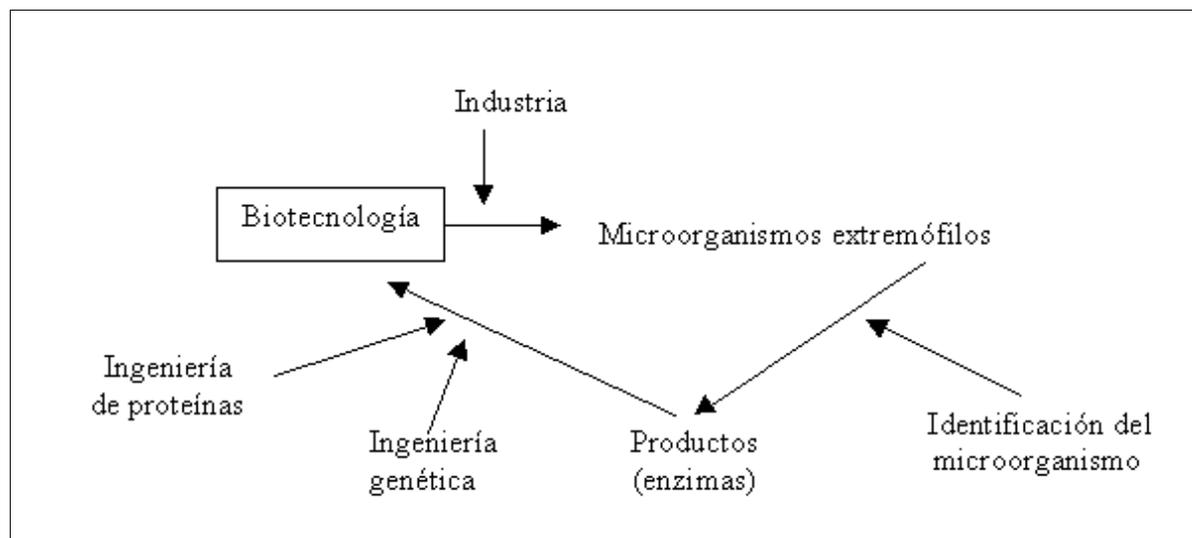
Los alcalófilos viven en suelos empapados con carbonatos y en las lagunas cársticas, como las que se encuentran en Egipto, en el africano Valle del Rift y en el oeste de los Estados Unidos. Nos encontramos con un nuevo ejemplo de lugares estratégicos en diferentes regiones del mundo por su localización y su desarrollo. Los enzimas procedentes de organismos alcalófilos ofrecen un gran interés para los fabricantes de detergentes, ya que éstos son muy alcalinos con los que se corre el riesgo de hacer inoperantes los enzimas que se añaden –generalmente proteasas y lipasas- para eliminar las manchas de alimentos y de otras fuentes de grasa.

Otro grupo significativo de extremófilos son los halófilos, que viven de preferencia en lagos salobres y en las cubetas o piscinas de evaporación de las salinas. Los microorganismos que habitan en estos medios están adaptados a la salinidad y a la alcalinidad elevada, pero las eventuales aplicaciones industriales de los enzimas provenientes de los microorganismos halotolerantes no son tan evidentes. Una posible aplicación se relaciona con el incremento del rendimiento en los procesos de extracción del crudo en los pozos de petróleo. Esta posibilidad mejora la acción de los enzimas que se utilizan para hidrolizar la goma guar, un polisacárido viscoso, también de origen natural ya que se aísla de una planta leguminosa y que mezclada con arena sirve para aumentar la luz por la que debe fluir el petróleo.

Relación entre extremófilos y nueva biotecnología

Hemos planteado que el creciente desarrollo de la biotecnología y el consiguiente interés industrial, ha suscitado un mayor interés por la búsqueda de vida microbiana en ambientes que, en una concepción apriorística, podrían considerarse como estériles.

Sin embargo, ese mismo interés por la aplicación industrial de este tipo de microorganismos ha hecho poner de relieve la importancia estratégica de la biotecnología como instrumento básico para rentabilizar el potencial biológico. Nos encontraríamos con un ciclo del siguiente tenor:



En efecto, la aplicación de una metodología clásica que descansara en el cultivo a gran escala de los organismos extremófilos de interés con la ulterior extracción y purificación de los enzimas por los métodos tradicionales, haría muy costoso este procedimiento y la aplicación industrial de estas proteínas (extremoenzimas) sería poco viable. Sin embargo, estos enzimas se pueden obtener por las técnicas de ADN recombinante, sin necesidad de preparar cultivos en masa de sus organismos de origen. Los genes del extremófilo, aislado de la naturaleza o a partir de cultivos en pequeña escala, se clonan, se insertan en microorganismos más convencionales (los "domésticos") que se utilizan para la producción a gran escala del enzima en cuestión.

La estrategia para identificar enzimas de interés potencial es doble: una trata de ensayar los extractos de las células de los microorganismos para comprobar su capacidad de hidrolizar los componentes específicos; luego, persigue aislar el ADN de todos los organismos vivos presentes en una muestra de material proveniente de un ambiente extremo e insertar los fragmentos del ADN de interés en un microorganismo "doméstico", con el fin de ensayar si las "nuevas" colonias formadas poseen una actividad enzimática "nueva".

La segunda estrategia, específica de la moderna biotecnología, permite eludir muchos de los obstáculos que pueden surgir en el desarrollo de los procesos tradicionales y facilita además la búsqueda de genes que codifiquen (cifren) determinados enzimas a partir de poblaciones mixtas, sin requerir el cultivo puro de los extremófilos, con lo que se obvia el paso del aislamiento y cultivo de estos organismos, paso que puede resultar problemático para este tipo de organismos tan exigentes con sus entornos naturales.

A pesar de la increíble diversidad en los microorganismos que existen en la tierra, es infrecuente que los enzimas naturales posean las propiedades ideales para una función determinada. De ahí que se acuda a la ingeniería de proteínas, otra de las técnicas esenciales de la moderna biotecnología, a través de dos aproximaciones: la primera, el *diseño racional*, que identifica primero las bases estructurales de la propiedad de interés y luego altera el gen del enzima de forma que la proteína incorpore la propiedad deseada; la segunda opción, *evolución dirigida*, persigue la introducción de cambios al azar en el gen que codifica por el enzima seleccionado, creando miles de versiones diferentes del enzima en cuestión, colección que se analiza para comprobar si hay alguna mejora de las propiedades.

Una visión molecular de la diversidad biológica

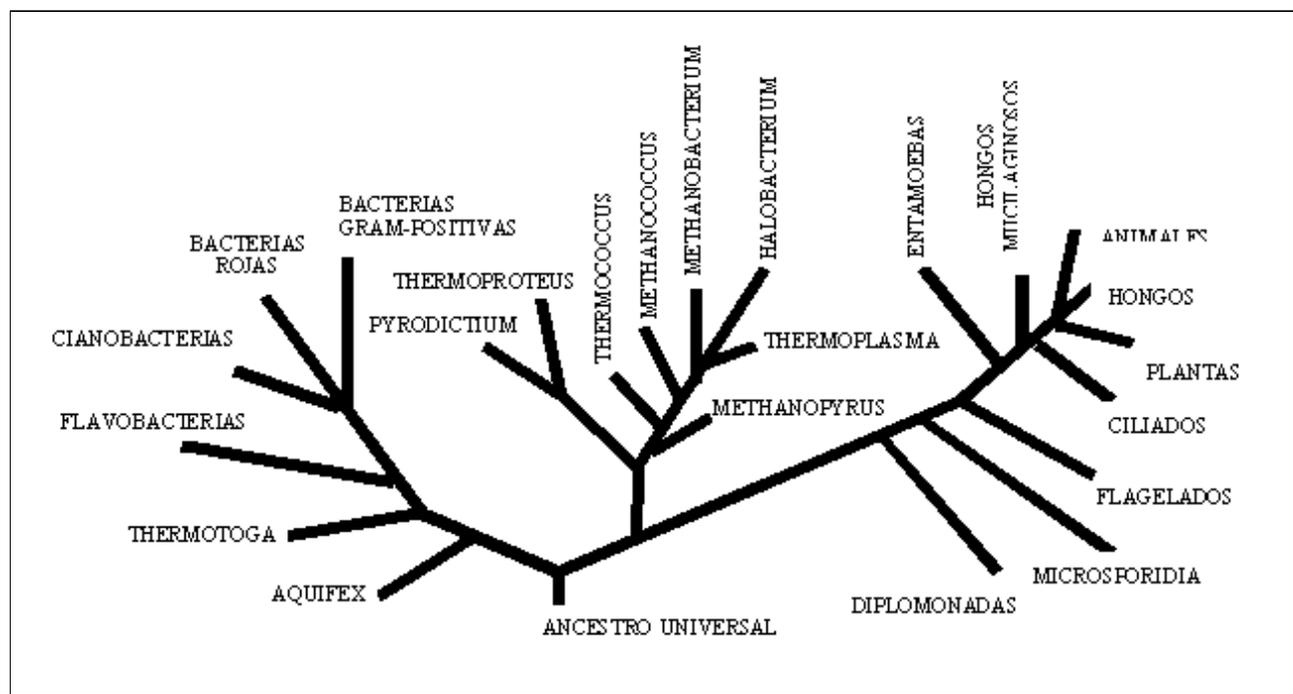
Una segunda importante consecuencia del interés que la biotecnología ha provocado en el

terreno de la microbiología en condiciones extremas se ha reflejado en una profunda revolución en el terreno de la ciencia básica y en la visión de la biodiversidad.

La existencia de la vida microbiana es un hecho reconocido científicamente desde hace sólo tres siglos, gracias a la invención del microscopio por A. van Leeuwenhoek. A pesar de este gran logro y con el posterior desarrollo de la microscopía, la sencilla morfología de los microorganismos no ofrece grandes posibilidades de clasificación a partir de dicha morfología, que es un criterio taxonómico esencial en los organismos superiores. En el siglo XIX se desarrollaron las técnicas del cultivo puro que permitieron el estudio de los microbios de forma individualizada y su caracterización sobre la base de criterios nutritivos. Si embargo, esta aproximación, que ha rendido notables resultados para el estudio y la aplicación de un número limitado de especies microbianas –bacterias como *Escherichia coli*, levaduras o hongos como *Neurospora crassa*–, supuso una evidente limitación para avanzar en el conocimiento de la complejidad de la vida microbiana y para establecer una taxonomía natural establecida de acuerdo con las relaciones evolutivas.

La aplicación de técnicas moleculares y el desarrollo de una perspectiva basada en la secuencia de genes están superando tales constricciones y limitaciones. Con los primeros resultados derivados del análisis molecular, se establecieron en 1969 cinco reinos: animales, plantas, hongos, protozoos y moneras (bacterias). Se acordó un nivel superior de distinción taxonómica entre eucariotas –organismos con núcleo individualizado y membrana nuclear- y procariotas –que serían los predecesores de los anteriores, careciendo de membrana nuclear- y se asumió que la principal diversidad evolutiva sobre la Tierra radicaría en los organismos eucarióticos que comprendían cuatro de los cinco reinos reconocidos.

Figura 1



El trabajo seminal de Carl Woese (véase, por ejemplo, Morell, 1997), estudiando de modo comparado las secuencias de los ARN ribosómicos de un número considerable de organismos diferentes, permitió concluir en 1977 que existían tres líneas primarias de evolución, los llamados reinos primarios (macro-reinos) o dominios: *Eucarya* (eucariotas), *Bacteria* (referidos en un principio como eubacterias) y *Archaea* (arqueobacterias en su acepción inicial).

La Figura 1 muestra que los macro-reinos o dominios *Eucarya* y *Archaea* tienen una historia común, mientras que el ancestro común está posicionado en la línea bacteriana. El periodo de historia evolutiva compartido por *Eucarya* y *Archaea* fue un tiempo importante en la evolución de las células, durante el cual debió tener lugar el refinamiento de los mecanismos primordiales de procesamiento de la información. De esta forma, representantes modernos de estos dos dominios -*Eucarya* y *Archaea*- comparten muchas propiedades que difieren de las células bacterianas en varios aspectos fundamentales.

La perspectiva filogenética molecular ofrece un marco de referencia para describir la diversidad microbiana; la secuencia de los genes se puede utilizar para identificar los organismos. La taxonomía microbiana se basó durante la primera mitad de este siglo en la descripción de las propiedades metabólicas, principalmente en la capacidad de utilizar fuentes nutritivas –carbón, nitrógeno y energía. En un principio, los estudios sobre metabolismo microbiano se focalizaron en organismos como *E.coli* o *Bacillus subtilis* que son "organótrofos", como los animales, es decir que reducen compuestos orgánicos para obtener energía y carbono. Sin embargo, la "organotrofia" no es la forma prevalente de metabolismo en el medio ambiente. El metabolismo autotrófico, la fijación de CO₂ en compuestos orgánicos reducidos, debe contribuir a una mayor producción de biomasa que el metabolismo organotrófico, al que suministra el indispensable apoyo. La energía para la fijación de CO₂ se recolecta por dos rutas: fototropía (fotosíntesis) o litotropía (acoplamiento de la oxidación de compuestos inorgánicos reducidos, como hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, o ion ferroso, a la reducción de un oxidante químico, un aceptor de electrones como oxígeno, nitrato, sulfato, azufre, o anhídrido carbónico). Por lo tanto, la diversidad metabólica de los organismos microbianos se puede generalizar en términos de organotrofia o autotrofia, fototropía o litotropía y en virtud del donador o aceptor de electrones.

La distribución filogenética de los diferentes tipos de metabolismo carbonado y energético entre los diferentes organismos no se ajusta al patrón evolutivo molecular a partir del ARN ribosómico. Existen, sin embargo, tendencias a nivel de los dominios, fundamentalmente en el caso de *Bacteria* y *Archaea*. Un elemento central que parece operar en la línea eucariótica es la integración física de otros organismos para generar simbioses que diversifican las vías o capacidades metabólicas.

La perspectiva o visión molecular nos suministra no sólo una mirada sobre el pasado evolutivo sino que abre las puertas a un futuro nuevo para la biología microbiana. Las identificaciones filogenéticas moleculares se basan en la determinación de secuencias y permiten que se produzca la identificación de microorganismos sin necesidad de recurrir al cultivo de los mismos, en contraposición a lo que exige una caracterización basada en propiedades metabólicas.

Estas nuevas técnicas permiten el análisis de los ecosistemas microbianos con una prospectiva amplia puesto que trascienden de un simple ejercicio taxonómico, ya que las secuencias suministran instrumentos –señales de hibridación molecular por ejemplo- que se pueden utilizar para identificar, seguir y estudiar a los integrantes microbianos de los ecosistemas naturales.

Uno de los sistemas más estudiados es el del Parque Nacional de Yellowstone, cuyas características geotermales ofrecen uno de los nichos más apropiados para estudiar la biología a altas temperaturas. Las fuentes termales presentan datos respecto a una rica diversidad de secuencias que representan la mayoría de los reinos bacterianos conocidos, e ilustran también unas divergencias entre reinos bacterianos nunca descritos a partir de la metodología clásica basada en el aislamiento y cultivo de microorganismos.

Pero es conveniente subrayar que no es necesario acudir a los ambientes extremos para encontrar un alto grado de diversidad, que nos rodea por todas partes.

Esta nueva orientación metodológica que permite estudiar la composición microbiana de ecosistemas naturales ofrece argumentos, a pesar del escaso número de casos estudiados, para reconocer que nuestra comprensión de la composición del mundo natural microbiano es muy rudimentaria. Es necesario utilizar el poderoso potencial de estas nuevas técnicas y estos intereses recientes –que surgen al coincidir la creciente atención por el desarrollo de la biotecnología con el reconocimiento de la importancia estratégica de la biodiversidad- para llevar a cabo el examen de una muestra representativa de los biotipos microbianos que existen en la Tierra. Realizar el catálogo completo es una tarea inabordable, y probablemente inútil, mientras que el análisis de una muestra representativa puede llevarse a cabo con un esfuerzo modesto y razonable con el recurso de las tecnologías de secuenciación automática. El análisis de 1000 clones –para detectar los tipos genómicos más abundantes- de cada uno de los 100 entornos que se pueden considerar diferentes, representa un esfuerzo comparable al esfuerzo de secuenciar un genoma microbiano. Las preguntas a las que se puede contestar son relevantes y variadas: ¿qué tipos de organismos pueblan el planeta, con los que compartimos sus recursos y de los que dependemos? ¿qué sistemas modelo escogeríamos para realizar estudios de los procesos ambientales a nivel de laboratorio? ¿Cuán completo es el acervo de la biodiversidad del que podemos aprender y utilizar como recurso? ¿Es posible recurrir a la distribución de microorganismos como un panel de biosensores para mapear y valorar los distintos soportes que se dan en la Tierra? ¿Existen linajes evolutivos más ramificados en el árbol de la vida de los que conocemos en el presente?.

Esta trayectoria de investigación que surge del círculo virtuoso entre biotecnología y ecología nos ofrece un cúmulo de oportunidades para descubrir nuevos organismos y para afrontar el desarrollo de recursos y procesos sustentados en la diversidad microbiana. Las técnicas de la moderna biotecnología son instrumentos básicos para desentrañar la distribución, el papel y las funciones de los microorganismos en el medio ambiente.

Los temas comunes en la diversidad microbiana

A pesar de la gran diversidad entre los microbios, estos seres vivos utilizan un conjunto de estrategias comunes para detectar y responder a las indicaciones del medio ambiente. Estas estrategias permiten una adecuada adaptación a los distintos nichos ecológicos, aunque se presentan variaciones que ofrecen nuevas posibilidades y requieren nuevas interpretaciones.

La identificación de genes bacterianos que se expresan en un entorno definido, o que son indispensables para el crecimiento en un ambiente, permite aproximarse a la prevención de enfermedades infecciosas de plantas o vertebrados, así como a la de los riesgos ambientales –como es el caso de la biocorrosión.

La percepción de las señales extracelulares por parte de las bacterias descansa en un conjunto complejo de mecanismos bioquímicos –sistemas de transducción de señales- que permiten desarrollar una diversidad de procesos o mecanismos: patogenicidad, procesos de desarrollo, invasión de los huéspedes, motilidad.

Muchas especies bacterianas interactúan con facilidad con superficies inanimadas o animadas para formar comunidades con un alto grado de adaptación. Las interacciones entre los patógenos microbianos y las células huésped desencadenan señales en cada una de las partes, cuyos principios básicos son profundamente similares para los patógenos de plantas y animales. Estos sistemas están muy conservados entre las especies y se

originaron versímilmente por transferencia horizontal de genes desde un ancestro común. Sin embargo, las proteínas efectoras que las bacterias escogen para transmitir a través de esos sistemas difieren según los patógenos de que se trate.

Se puede concluir que ha aumentado el conocimiento sobre la filogenia microbiana, pero sólo se conoce una pequeña proporción del "pool" genético de origen microbiano. A medida que se vayan conociendo, secuenciando, los genomas de un número creciente de microorganismos, la identificación de genes conservados suministrará información sobre las causas del carácter patógeno pero, sobre todo, la información sobre los genomas microbianos suministrará datos sobre los microbios potencialmente útiles y sobre los enzimas y actividades metabólicas que sostienen la vida en la tierra en la gran variedad de nichos existentes.

Agricultura, biotecnología, desarrollo y sostenibilidad

La agricultura es uno de los tres clásicos sectores económicos, que parece ir cediendo predicamento en los últimos tiempos, primero frente a la industria –la revolución industrial- y en la última mitad de este siglo ante los servicios. Sin embargo, la agricultura es uno de los sectores fundamentales para el mantenimiento de nuestra civilización e indispensable para mejorar la calidad de vida de los ciudadanos. Es evidente (Estruch, 1998) que, a lo largo de la historia de la humanidad, la agricultura y sus prácticas productivas han estado muy ligadas al desarrollo con la persecución de un objetivo específico y concreto: proveer de alimento suficiente para mantener el crecimiento de la población.

En los momentos presentes asistimos a una demanda creciente de producción agrícola que corre en paralelo con la constatación de que disminuye el porcentaje de suelo arable, de que decrece la calidad del suelo disponible y de que se reduce la eficacia de las prácticas del control de plagas (Muñoz, 1997a, 1997b, Estruch, 1998).

La gran parte de los programas orientados al control de insectos se basan en la aplicación de insecticidas, generalmente compuestos químicos de carácter tóxico. A pesar del uso masivo de estos productos, que además contaminan suelos y aguas, se siguen perdiendo elevados porcentajes, alrededor del 30 por ciento, de las cosechas mundiales por mor de los insectos.

En una menor proporción –alrededor del 5 por ciento- se han utilizado insecticidas de origen biológico, bioinsecticidas, que se basan en combinaciones de proteínas derivadas de la bacteria, *Bacillus thuringiensis*. Esta bacteria, descubierta a principios del siglo que ahora termina, fue aislada de los cadáveres del gusano mediterráneo de la harina en Turingia por el alemán E. Berliner. Este investigador intuyó que la bacteria era el agente causal de la muerte del insecto y sugirió su empleo para combatir las plagas de insectos. Los primeros preparados de *B. thuringiensis*, se comercializaron a finales de 1930 en Francia para utilizarlos contra el taladro del maíz (la oruga de *Ostrinia nubilatis*), una de las peores plagas de esta gramínea de gran valor nutritivo y económico.

Posteriormente, finales de los años cuarenta, se estableció que la actividad insecticida de *B.thuringiensis* estaba asociada a la producción de cristales de naturaleza proteica en las esporas. Estas proteínas son δ -endotoxinas, actúan interaccionando con las membranas de las células intestinales de los insectos y provocan la lisis celular. Se han descubierto casi un centenar de endotoxinas diferentes que muestran una gran eficacia insecticida y una muy limitada toxicidad.

Plantas transgénicas con resistencia a insectos

La importancia estratégica de las proteínas bacterianas como insecticidas específicos y el advenimiento de las modernas técnicas al ámbito de la biotecnología vegetal promovieron el desarrollo de un amplio programa encaminado a la obtención de plantas que ofrecieran resistencia a los insectos por la introducción de genes que codifican proteínas con actividad endotóxica. En ese ambicioso programa han intervenido numerosos grupos de investigación de universidades americanas y europeas y empresas fundamentalmente norteamericanas (Agracetus, Agrigenetics, Monsanto).

A continuación se ofrece un diagrama de los principales eventos que han llevado a la consecución de variedades comerciales de plantas transgénicas resistentes a insectos, que han entrado en el mercado en 1996 como es el caso del algodón, maíz y patata transgénicos.

Año	Hecho científico	Organización
1981	aislamiento gen y su caracterización	Dpto. Microbiología (Universidad de Washington)
1983	primera planta transgénica (tabaco)	Idem
mediados ochenta	tabaco transformado con gen de endotoxina	Dpto. Genética (Universidad de Gante)
"	selección plantas con proteína marcadora (resistencia a kanamicina) Ø alto nivel de expresión	Idem
"	diversas configuraciones de endotoxinas (protoxina vs toxina)	Idem
"	introducción genes de endotoxinas en tabaco	Agracetus Agrigenetics
"	introducción genes de endotoxinas en tomate	Monsanto

Fuente: *Investigación y Ciencia*, febrero 1998; elaboración propia.

Este conjunto de experimentos y ensayos llevados a cabo en plantas modelo, sirvieron para poner de manifiesto que la expresión de proteínas insecticidas en plantas era posible y eficaz contra los insectos. Sin embargo, aunque los genes aislados de *B. thuringiensis* podían expresarse en su forma nativa en plantas, los niveles de proteína sintetizada eran muy bajos –apenas alcanzaban el 0,01% de las proteínas totales de la planta-, por lo que limitaba el interés comercial de los ensayos. Por otro lado, los laboratorios y empresas, si buscaban una aplicación comercial de las plantas transgénicas, tendrían que aplicar la técnica a plantas con mayor impacto en la agricultura como maíz, algodón, arroz o cebada.

Para profundizar en estos requisitos, se hizo necesario avanzar en el conocimiento de los mecanismos moleculares implicados y dominar el cultivo de tejidos. Se pudo descubrir así que las plantas, al expresarse en ellas los genes que codifican las endotoxinas, procesaban

o cortaban en exceso los correspondientes ARN mensajeros. Este defecto era consecuencia de la diferente composición en bases de los genes de la bacteria proveedora y los genes de la planta receptora. La abundancia de pares con adenina/timina (A/T) –frente a guaninas y citosinas (G/C)- confundía a la maquinaria encargada de la transcripción de la planta.

Por ello, fue necesario efectuar modificaciones puntuales en los segmentos A/T de los genes de *B. thuringiensis*. Una investigación adicional permitió identificar una diferencia trascendental entre los genes de la bacteria y los de la planta: la tercera base de los codones (tripletes de bases) que codifican los aminoácidos de *B. thuringiensis* suele ser adenina, mientras que la base que ocupa esa posición en las plantas –sobre todo entre los monocotiledóneas- suele ser guanina o citosina. Fue preciso obtener un "gen sintético" con la modificación sistemática de los codones del gen de *B. thuringiensis*, lo que permite disponer de un gen específicamente diseñado para maximizar su expresión en las plantas, sin alterar la secuencia de la proteína final, condición indispensable para que cumpla la función deseada.

Este ejercicio de "auténtica ingeniería" pone sordina, en nuestra opinión, a dos críticas de los detractores de la aplicación de la ingeniería genética a la agricultura: a) no se incorporan genes idénticos a los de origen natural, sino que hay que construir nuevos genes, lo que limita las posibilidades de "accidentes naturales" en el ecosistema y de que aumente la resistencia; b) el proceso de innovación es altísimo- no se está descubriendo, sino realmente inventando- por lo que las patentes sobre estos procesos y productos no tendrían ninguna objeción.

Las variedades comerciales, que se han introducido en el mercado o están en vías de introducirse son las siguientes:

Cultivo	Resistencia frente	Empresa	Comercialización
Algodón	Larvas de dos lepidópteros (complejo del capullo)	Monsanto	EEUU (1996)
Patata	Escarabajo de la patata	Monsanto	1996
Maíz	Taladro del maíz	Ciba Semillas	1996

Fuente: *Investigación y Ciencia*, febrero 1998

En marzo de 1998, dos variedades de maíz resistentes al taladro, denominadas Compa CB y Jordi CB, han sido inscritas en el Registro de Variedades comerciales.

El caso del arroz

El arroz es un alimento básico. Constituye la dieta de supervivencia para unos dos mil millones de personas. Los campos de arroz cubren 145 millones de hectáreas y producen 560 millones de toneladas, pero el rendimiento que supone esta cosecha es bajo, puesto que el cultivo es atacado por bacterias, virus hongos e insectos.

Una de las plagas más devastadoras es la "marchitez" ("seca" o "quemada") causada por bacterias, especie *Xanthomonas oryzae*, comunes en Asia y Africa.

Como muestra del éxito evolutivo, el arroz posee un insólito surtido de genes que ofrecen protección frente a un gran número de enfermedades, incluida la marchitez. Sin embargo, para infortunio –y como muestra del lastre de la selección o mejora en función de un limitado número de caracteres-, ninguna variedad de la especie común tiene todos los genes, por lo que las plantas son más vulnerables a unas enfermedades que a otras- una nueva prueba del éxito de supervivencia; en este caso, para los agentes patógenos.

Los mejoradores han tratado de trasladar la riqueza genética de variedades resistentes a otras con mayor interés alimentario. Pero los procesos de mejora son laboriosos, arriesgados con respecto al éxito, de modo que puede ocurrir que transcurran decenas de años hasta obtener la planta con los caracteres deseados.

La moderna tecnología del ADN recombinante permite introducir, de modo específico y exclusivo, genes de resistencia a enfermedades. Un grupo de investigadores, entre los que destaca P.C. Ronald de la Universidad de California en Davis con colegas de esa Universidad y de la Universidad de Cornell, ha estado trabajando en el aislamiento y clonación de un gen, a partir de una especie silvestre de arroz originaria de Mali, que confiera resistencia a una serie de formas comunes de "marchitez" de origen bacteriano (Ronald, 1998).

Un largo y concienzudo programa de investigación ha permitido aislar el gen Xa 21, tras identificar su situación en el cromosoma 11. Tras el aislamiento, se multiplicaron fragmentos de ADN que incluían dicha región, se copió el ADN en bacterias y se recurrió a la técnica biolística –disparo con píldoras de oro que estaban cubiertas con réplicas de ADN. El gen se ha incorporado en dos variedades populares que ocupan nueve millones de hectáreas de cultivo en Asia y Africa y en una variedad, Ming Hui 63, de gran consumo en China.

Conclusiones y prospectivas

- Se han presentado una serie de argumentos y casos que ilustran la influencia y el impacto de la biotecnología para un desarrollo sostenible, en términos sociales y ambientales, asentado en la diversa riqueza cultural de países y regiones.
- Los ejemplos que se han discutido ponen de manifiesto el carácter de tecnología evolutiva de la biotecnología, como he defendido anteriormente (Muñoz, 1997a) frente a los que la asocian con tecnologías revolucionarias o sustitutivas.
- El sustrato cultural en que se asienta el desarrollo de la biotecnología es muy amplio, ya que descansa tanto en sustratos científicos y técnicos como en los aportes productivos y comerciales.
- Las repercusiones positivas de la utilización de plantas transgénicas trascienden de los beneficios directos que recaban los agricultores que las utilizan o las empresas que las comercializan. En general, la calidad de las cosechas es mayor a la par que se reduce el nivel de insecticidas químicos, lo que redundará también en favor del consumidor.
- Los campesinos del Tercer Mundo no pueden permitirse el uso de técnicas que requieran el suministro de herbicidas caros, pero pueden recurrir a variedades transgénicas. En el caso del arroz, si el comportamiento de las líneas no desmerece de lo que ofrecen las variedades adaptadas localmente, los programas nacionales de mejora podrían distribuir semillas a los agricultores de países en desarrollo. Dado que el transgén de la resistencia a enfermedades se transmite a la progenie, los agricultores podrían cultivar sus propias semillas para la temporada siguiente (Ronald, 1998).
- Algunos críticos siguen diciendo que los logros de la biotecnología vegetal son inexistentes (Simmonds, 1998), pero esa afirmación no es exacta. Los ejemplos que ofrecen los millones de hectáreas que se cultivan hoy en día en los Estados Unidos y

la gran variedad de arroces transgénicos que se producen en China, India, Colombia, con resistencia a enfermedades y con mejoras a la productividad, testifican lo contrario (Conway, 1997). ▲

GLOBALIZACIÓN Y PERSPECTIVA TECNOLÓGICA

Las relaciones con el medio ambiente y las nuevas biotecnologías

Introducción

El análisis de la globalización desde una perspectiva tecnológica (o tecnocientífica) no puede dejar de lado las relaciones que, en este momento de la historia, ofrece la tecnología con la visión económica y con la creciente preocupación social y política por el medio ambiente.

Es archiconocido que estamos inmersos en una sociedad tecnocientífica, pero es, asimismo, evidente que esta preeminencia científico-tecnológica viene condicionada, en las sociedades avanzadas, por el impulso de los ciudadanos para intervenir en el debate crítico y en la toma de decisiones que afectan a la política de la ciencia y la tecnología tanto desde el plano público como en el privado.

Estas preocupaciones ciudadanas se enmarcan en un paisaje global en el que los problemas del cambio climático, su incidencia sobre el medio ambiente, así como las posibles repercusiones sobre la calidad de vida de los miembros de las sociedades avanzadas que plantean los avances científico-tecnológicos –la universalización de las tecnologías de la información como instrumento ambivalente de poder y servidumbre; las nuevas tecnologías de la vida con su incidencia en todos los sectores de la actividad humana- se cruzan con los movimientos solidarios con los ciudadanos que no han alcanzado el umbral de (nuestro) desarrollo. Se configura así un cuadro de creciente complejidad en el que la ciencia y la tecnología juegan un papel preponderante, aunque el alcance de este papel debe ser escrutado cuidadosamente aplicando principios de precaución.

Parece indudable que nos enfrentamos a un problema de extrema complejidad, difícil de abordar por uno sólo, menos aún por alguien limitado como el autor de este artículo. Por eso, en él me circunscribo a abordar las relaciones entre economía, tecnología y medio ambiente y a explorar dentro de este tipo relacional las potencialidades que nos ofrecen las nuevas tecnologías, biológicas.

Los límites del crecimiento. Tecnología y medioambiente

Quizá el punto de inflexión en la relación de la economía y la producción con el medio ambiente surge de la preocupación por los límites del crecimiento y su conexión con los usos de la tecnología.

En la primera mitad del siglo que ahora termina, el movimiento conservacionista estaba dominado por el principio y la perspectiva de la "producción eficiente". El término "conservación" surgió para describir los nuevos modos de gestionar los recursos que implicaban la aplicación de la ciencia y la tecnología y que procuraban (planeaban) el desarrollo y la utilización de tales recursos.

En sus orígenes, el movimiento pro-conservación estaba estrechamente ligado con la práctica de la gestión científica, tanto en sus conceptos como en los personajes que

actuaban como líderes. A partir de los años 60, se produjo un cambio en la visión dominante a través del "movimiento ambientalista" que hizo surgir las nociones de "calidad", "satisfacción", "placer" (*amenity* según Hays, 1998) en contraposición al concepto de desarrollo económico eficiente, que primaba hasta entonces. Aparecieron nuevos conceptos que trascendían el argumento productivo para proyectarse sobre la idea de disfrute en relación a la preocupación por la calidad del medio, que se consideraba a su vez necesaria para tal disfrute. El aire, la tierra y el agua, dejaron de ser consideradas como mercancías que se configuraban como un servicio público para depositar y almacenar los residuos resultantes del proceso productivo, para concebirse entonces como el entorno en el que los seres humanos trabajan, viven y se divierten. Este enfoque basado en el disfrute (*amenity*) se enfrentaba a la visión conservacionista tradicional y, de este modo, los héroes de ese pasado conservacionista se transformaban en villanos de la nueva orientación.

La controversia entre las perspectivas productivistas y lúdicas en relación con la calidad ambiental persisten incluso dentro del movimiento proponente de esta noción de calidad. Para unos, calidad ambiental significa esencialmente "producción limpia" con la aceptación de la visión gestionaaria basada en la ciencia y la tecnología y con la asunción de la ideología del crecimiento material. En esta perspectiva, se antepone o superpone el adjetivo limpio al adjetivo eficiente respecto al término producción. Para otros, asociados al sector lúdico, surge la preocupación por los límites del crecimiento, una posición que se contrapone a la antigua visión impulsora de la producción eficiente, a gran escala, pero que se opone igualmente a la posición moderna de los ambientalistas "modernos" que se preocupan esencialmente de la limpieza del aire, del agua o de la salud ambiental. Esta visión "modernista" asume que lo que la tecnología ha generado en términos de residuos contaminantes, puede ser limpiado o corregido por la tecnología, de forma que sí se consigue un sistema de reciclado en el tratamiento de los residuos, no es necesario preocuparse por el nivel de las materias primas o de los recursos naturales.

Visiones desde la economía. Crecimiento económico, capacidad de stock y medio ambiente

En el número 28 de abril de 1995 de la revista *Science*, un grupo de reputados economistas encabezado por Kennet Arrow (Arrow *et al*, 1995) publicaba un artículo en el que se cuestionaba el argumento de que el crecimiento económico y la liberalización económica son beneficiosos para el medio ambiente. En ese artículo, los autores revisaban la relación entre crecimiento económico y calidad ambiental, así como la conexión entre la actividad económica y la capacidad de stock y de adaptación del medio.

Los autores del artículo sostenían que la base de los recursos ambientales que soporta la actividad económica es finita. Por ello, el uso imprudente de esa base puede conducir, de modo irreversible, a una pérdida de capacidad para la generación de material productivo. Ello implica que es evidente que existen límites en el stock de recursos. Este stock no es fijo, ni estático, ni depende de relaciones simples. Depende de la tecnología y sus aplicaciones, de las preferencias sociales y de la estructura de la producción y del consumo. Es, asimismo, dependiente del estado cambiante de las interacciones entre el medio físico y el medio biótico.

El índice que mide la intensidad de la economía humana respecto a la capacidad de la biosfera es útil para reflejar la escala de la apropiación humana en lo que concierne a la producción primaria de la biosfera; que se ha calculado en un 40 por ciento (Vitousek *et al.*, 1986). Sin embargo, un índice más útil para medir la sostenibilidad ambiental se refiere a la capacidad de adaptación de los ecosistemas, entendida como la medida de la magnitud de las alteraciones que pueden ser absorbidas, cuando un sistema equilibrado en un determinado lugar, cambia a otras circunstancias o condiciones. El índice de adaptación no

es fácil de medir –varía además de un sistema a otro y de un tipo de perturbación a otro-, aunque es posible identificar una serie de indicadores y señales de atención que detectan el estrés ambiental.

La pérdida de la capacidad de adaptación es importante por una serie de razones: i) puede suponer una pérdida repentina de productividad biológica y, consecuentemente, una reducción en la capacidad para dar soporte a la vida humana; ii) puede representar un cambio irreversible para el conjunto de opciones que se abren a las generaciones presentes y futuras (entre los ejemplos cabe mencionar, la erosión del suelo, el agotamiento de las reservas hidráulicas superficiales, la desertificación y la pérdida de biodiversidad).

La sostenibilidad de las actividades humanas exige que los sistemas ecológicos sobre los que se sustentan nuestras economías sean adaptables. Los autores del artículo citado concluían que la liberalización económica y las políticas que promueven el crecimiento del producto nacional no son capaces de sustituir a una política ambiental. Los daños ambientales, entre los que hay que incluir la pérdida de adaptación, ocurren con frecuencia de modo brusco y son, con frecuencia, irreversibles.

Pero estos cambios bruscos no son fácilmente predecibles a partir de los sistemas de señales que, en una gran mayoría de casos, no se perciben, o bien son interpretados de modo erróneo, o no forman parte de la estructura de incentivos sociales. Todo ello tiene que ver con la falta de conocimiento sobre los efectos dinámicos de los cambios en las variables del ecosistema (por ejemplo, niveles o umbrales, capacidad de acomodación, y pérdida de adaptación) y a la existencia de barreras institucionales, así como a la ausencia de unos derechos de propiedad bien definidos y establecidos.

Los argumentos planteados por Arrow y cols. suscitaron una serie de reacciones. El debate no se ha clausurado. Algunos discrepantes recomendaban concentrarse en profundizar en el conocimiento de los determinantes, económicos, ecológicos y políticos, del cambio medio ambiental, en lugar de proseguir en la senda del refinamiento para definir el concepto de "sustentabilidad" o "sostenibilidad". Otros alzaban sus voces frente al predominio del concepto idea de adaptación, por considerar éste excesivamente antropomórfico y por estimar que es un reflejo de la filosofía del "laissez-faire" que deja de lado toda gestión científica o técnica. Para otros, el factor población aparece como un predictor relevante para estimar la carga de dióxido de carbono que se va acumulando como producto de la actividad humana.

El debate sobre la innovación tecnológica

Los temas relativos a la innovación tecnológica se sitúan en el centro del debate respecto a la posibilidad de mejorar las condiciones de vida en el contexto de un medio ambiente más limpio. Por ello, las tecnologías limpias se han constituido en el foco de atención dentro del impulso pro-ambiental de las últimas décadas, que ha conducido a la promoción de un amplio conjunto de nuevas tecnologías productivas a las que se designa, en su conjunto, como "tecnologías verdes".

Estas tecnologías han experimentado una oposición persistente al ser acusadas de excesivamente utópicas o de demasiado costosas. Esta resistencia ha sido calificada por los tecnooptimistas como un movimiento "antitecnología", aunque su principal dirección se encamina a mostrar la resistencia para la introducción de tecnologías más aceptables desde el punto de vista del medio ambiente. El debate sobre las tecnologías ha surgido en medio de una variedad de temas relacionados con la protección ambiental, que abarcan desde el tratamiento de residuos hasta la reducción de fuentes de productos contaminantes en diferentes procesos industriales.

Los esfuerzos realizados en esta dirección no han atraído la atención de los analistas sociales, pero sus implicaciones son importantes. En efecto, el mundo productivo se encuentra preocupado por dos tipos de tecnologías: unas avanzadas, eficientes y, probablemente, menos nocivas para el medio; otras que son menos avanzadas, más contaminantes y, por ende más perjudiciales para el ambiente que las tecnologías más tradicionales. Dentro del contexto actual, el impulso pro-ambientalista o movimiento ambientalista persigue el desarrollo del primer tipo, mientras que una parte importante del sector económico se resiste al cambio y mantiene el segundo tipo. La transición desde uno a otro tipo transcurre lentamente. El tamaño y la escala de producción en una determinada empresa es un factor que, a menudo, consolida la resistencia a la innovación. La alta inversión en un conjunto de tecnologías crea un campo de resistencia frente a las nuevas tecnologías que requieren nuevas inversiones.

El objetivo del provecho financiero, que se persigue continuamente, condiciona muchas decisiones acerca de las tecnologías ambientales. En este contexto, los apoyos de los movimientos ambientalistas a las tecnologías más avanzadas, como el tratamiento de residuos o la prevención de los mismos, la producción de papel en ausencia de cloro, o el uso del kenaf como fibra de papel, se enfrentan a obstáculos, cuya superación es un proceso lento. Con frecuencia depende de la identificación de nichos en los procesos de producción que se pueden rellenar con iniciativas a pequeña escala que permiten ser competitivos en economías de escala; en otros casos, en un contexto globalizado, estas nuevas tecnologías son importadas por las grandes economías hacia las más pequeñas o menos desarrolladas.

Tecnologías emergentes. ¿Revolución o evolución?

Desde el discurso socio-económico y político, e incluso desde los mensajes científicos, se suele utilizar el término revolución cuando la incorporación de nuevas tecnologías en un sector productivo produce cambios trascendentes en los medios y modos de producción. Así se ha hablado de la Revolución Industrial cuyo origen se sitúa en Gran Bretaña y que se resume en la transformación de una economía tradicional agraria hacia una sociedad urbana cuyos pilares eran la tecnología de las máquinas. La industrialización británica se produjo en una coyuntura especial del desarrollo del capitalismo (Kemp, 1987) como reflejo del movimiento del capital de una esfera de circulación a la del control sobre ciertos sectores de la producción. Coincidió con un cambio técnico en estos sectores, donde se pasó del predominio de la herramienta manual al de la máquina, y se aplicaron nuevos procesos en los que se utilizó el carbón y la máquina de vapor. La expansión de la industrialización hacia otros países europeos se ha visto como un proceso de difusión, específicamente hacia las regiones dotadas de recursos naturales adecuados.

La mejora genética y la selección dieron lugar a la Revolución Verde que ha conseguido incrementar la producción de alimentos, permitiendo multiplicar la producción global de las 17 cosechas principales por un factor 2,4, sin apenas variar la superficie cultivada (García Olmedo, 1998).

La informática y los computadores han colocado a la sociedad actual en un entorno donde la producción virtual es posible. Las nuevas biotecnologías que persiguen el desarrollo de productos biotecnológicos que son manufacturados por la vía del ADN recombinante, del ARN recombinante, de la tecnología de fusión celular, han dado lugar a la reflexión y posicionamientos que consideran a esta nueva biotecnología como elemento clave para buscar orientaciones en el desarrollo económico y social respecto a una variedad de actividades productivas e industriales. Esta emergencia de la nueva biotecnología ha dado lugar a que se acuñe el término de revolución biológica aplicada a la producción.

El debate en torno a la biotecnología. La visión evolucionista

El debate en el dominio socio-económico sobre el carácter de la biotecnología como nuevo sistema tecnológico, que conduciría a una revolución socio-económica, hizo furor a mediados de la década de los noventa. En un trabajo reciente (Muñoz, 1997a) he revisado los argumentos en pro y en contra para identificar la introducción de la biotecnología en los sectores productivos como una revolución. Mi propuesta se inclina a considerar la biotecnología, más apropiado sería hablar de biotecnologías, como una tecnología evolucionista en lugar de revolucionaria.

Esta posición se basa en el análisis de los cambios científicos y técnicos producidos, en el examen de la incidencia sobre los sectores productivos que, en el caso de la biotecnología, se extienden por los tres sectores convencionales en que se divide la economía productiva y en el carácter de las aplicaciones tecnológicas.

En resumen, las biotecnologías se pueden considerar como tecnologías interdisciplinares, multifacéticas, capacitadoras y horizontales. Tratan de aprender de los procesos biológicos para desarrollar en la mayoría de los casos innovaciones incrementales. Se mejoran propiedades en los productos o los rendimientos y calidades en los procesos, pero no se produce algo nuevo, distinto de lo que existe en la naturaleza, ni se cambia drásticamente un proceso. Se produce una adaptación o se persigue el éxito en función de un entorno. No se obtienen monstruos, aunque el mito de Frankenstein sea evocado en frecuentes ocasiones por los detractores o por los prudentes ante el uso de esta tecnología.

Parece relevante insistir en el argumento que he utilizado repetidamente de que las aplicaciones de la biotecnología y sus repercusiones son diferentes según los sectores en los que esa aplicación se produzca (Muñoz y Bas, 1997, Muñoz, 1997c). Por ello, el análisis de los beneficios y problemas que presentan las aplicaciones agrícolas, industriales o terciarias de la nueva biotecnología requiere un examen pormenorizado de casos y posibilidades que vayan diseñando el mapa evolutivo de las posibilidades y realidades de estas tecnologías.

Como ya se ha señalado anteriormente en diversas ocasiones (véase por ejemplo, Muñoz y Bas, 1997), el ritmo del progreso científico y tecnológico no ha sido el mismo en los diferentes sectores de aplicación de la nueva biotecnología, como consecuencia de las condicionantes económicas, los problemas científicos y técnicos y los requisitos exigidos para la explotación comercial que son diferentes para cada sector (agrícola, agroalimentario, ganadero, sanidad animal, y salud humana, aplicaciones en el sector terciario, en particular tratamientos preventivos y correctores de problemas ambientales).

El sector agrícola

El uso de la nueva biotecnología en la agricultura parece estar en conflicto con la aplicación de la llamada agricultura biológica y con el concepto de biodiversidad. Es preciso reconocer, sin embargo, que la agricultura se enfrenta a los problemas de alimentación y desarrollo, alimentación y población, alimentación y territorio.

El equilibrio alimentario es precario, a pesar de que la agricultura ha experimentado, a lo largo de su historia, cambios muy profundos que han permitido su éxito, acelerando el ritmo para adaptarse al paso de las exigencias.

A pesar de estos satisfactorios resultados, el mundo continúa sufriendo, en una parte importante de su población, los rigores del hambre. La tecnología y el incremento de los recursos alimentarios no han sido capaces de compensar la cinética exponencial de la

demografía mundial. En este terreno, las razones de los desequilibrios radican principalmente en cuestiones geopolíticas, las cuales residen generalmente en las relaciones conflictivas entre países productores y consumidores. En todo caso, la tecnología progresa de modo constante. Después del período de la agricultura "extensiva", caracterizado por el predominio de la química y la mecanización, llega el período de las nuevas biotecnologías.

Esta consideración abre quizá el interrogante sobre si nos encontramos en el preludio de una nueva revolución en la historia de la agricultura. Los expertos estiman que las nuevas biotecnologías van a mejorar los rendimientos agrícolas. En un editorial de la revista *Science* (27 de marzo, 1998), el antiguo editor de la revista, P. Abelson, establecía bajo el título "A Third Technological Revolution" que "una nueva gran era, la revolución genómica, está en sus principios... y que, en resumen, el mayor impacto global de la genómica será la consecuencia de la manipulación del DNA de las plantas. En último extremo, el mundo obtendrá la mayoría de sus alimentos, combustibles, fibras, productos químicos y algunos medicamentos a partir de árboles y plantas alterados genéticamente".

Las metas que se podrían conseguir con su concurso serían: huir de una búsqueda denodada de la superabundancia para buscar un progreso de carácter más cualitativo, obtener productos agrícolas de uso menos agresivo, menos costosos a largo plazo y al mismo tiempo más ecológicos –al ser menos dependientes de los abonos químicos- y quizá más adaptables en ciertas circunstancias a las condiciones climáticas y geoquímicas de las zonas áridas. Se alzan de este modo grandes esperanzas en la convergencia entre las grandes empresas agrícolas y los biotecnólogos.

El fenómeno de la globalización parece ajustarse a esta re-orientación biotecnológica de la agricultura. En efecto, las grandes firmas –Dow Chemical, Du Pont, Monsanto, Novartis, Pioneer Hi-Bred y Agrevo- están realizando costosas inversiones (miles de millones de dólares anualmente) para desarrollar investigación propia en el ámbito de la nueva biotecnología o para adquirir acciones de las compañías orientadas a la investigación y explotación genómica. Por ejemplo Du Pont ha adquirido el 20 por ciento de la empresa Pioneer Hi-Bred, el mayor productor y distribuidor de maíz, mientras que la empresa biotecnológica Calgene es propiedad de Monsanto mientras que Mycogen está bajo el control de Dow.

En los primeros años de esta "revolución" genómica en agricultura, las empresas más importantes llevaron a cabo proyectos encaminados a obtener resistencia frente a los herbicidas que ellas mismas producían; también se orientaron a la obtención de resistencia frente a plagas y pestes. Esta orientación ha generado críticas sociales. El énfasis se está poniendo ahora en otras áreas, en particular buscando la mejora de la calidad de los componentes grasos presentes en los alimentos.

El sector agroalimentario

Este es el sector o área en que primero se incorporaron las innovaciones biotecnológicas y las nuevas biotecnologías estaban más introducidas en este sector que en cualquier otro. Ello tenía relación con el hecho de que estuvieran aceptadas y reconocidas en la producción de alimentos y bebidas las aplicaciones de los procesos biotecnológicos tradicionales, fermentaciones y aplicaciones enzimáticas. Estos procedimientos de transformación eran desarrollados, utilizados y aceptados por los consumidores y canalizados reglamentariamente antes de que ocurriera la irrupción de las nuevas biotecnologías. Las aplicaciones de estas nuevas biotecnologías están, sin duda, muy influenciadas por las transformaciones que experimentan los mercados alimentarios, particularmente en relación con la protección de los consumidores, con la seguridad

alimentaria y con las exigencias agroalimentarias relacionadas con la composición y el etiquetado de los alimentos. Entre las aplicaciones actualmente en el mercado cabe mencionar: los enzimas para la bioconversión de los hidratos de carbono, los aromas y acentuadores del sabor, los jugos de frutas, los aminoácidos y otras moléculas nutritivas, los alimentos fermentados de diversa procedencia con nuevas texturas, propiedades y características; los enzimas utilizados en quesería; los productos lácteos delactosados; las levaduras híbridas.

El sector agropecuario

Las aplicaciones de las nuevas biotecnologías al desarrollo y explotación de animales domésticos han sido menores en número y relevancia que las llevadas a cabo sobre vegetales y plantas. La "nueva zootecnia" ha progresado más lentamente que la línea de las plantas modificadas genéticamente por razones técnicas, éticas y sociales. Sin embargo, los últimos años están siendo testigos de los progresos científicos y técnicos más resonantes con la obtención de animales transgénicos, que pueden ser utilizados como modelos experimentales para enfermedades humanas, como se puede ejemplificar en el caso del onco-ratón –uno de los casos más debatidos en relación con el tema de las patentes-; o que se emplearán para xenotransplantes – una de las cuestiones que provoca mayores divergencias en la percepción y opinión entre las sociedades europeas-, o los experimentos de clonación que han generado una enorme alarma social, lo que ha supuesto la dramatización del debate social y ético sobre estas cuestiones, antes de que se hubieran alcanzado acuerdos y métodos para que ese debate transcurriera por límites racionales.

A estos logros, aunque todavía limitados y controvertidos, hay que añadir el importante arsenal de procedimientos diagnósticos y vacunas aplicadas a la medicina veterinaria en relación con las más importantes epizootias en términos de alcance económico o en la aplicación de los tratamientos y diagnósticos a los animales de compañía.

La acuicultura, cultivo de peces en condiciones de estabulación, constituye un recurso de creciente valor económico en el que las nuevas biotecnologías pueden tener un valor estratégico, especialmente para abordar y corregir problemas relacionados con la mejora genética, la nutrición y la patología, que son los cuellos de botella con los que se enfrenta el cultivo de peces.

El sector farmacéutico

Este sector ha sido el que más rápidamente ha incorporado las nuevas biotecnologías al desarrollo de productos terapéuticos y de diagnóstico. A principios de los años noventa se estimaba que el negocio de este sector alcanzaba cifras del orden de mil millones de dólares. Es evidente que estas cifras no se refieren sólo a la preparación de productos de diagnósticos y de medicamentos por la vía de la ingeniería genética, sino que en ellas se incluyen también los datos relativos al empleo de técnicas de fusión celular –anticuerpos monoclonales-. Ha sido este sector el motor de la fiebre biotecnológica que surgió en Estados Unidos y que en el período 1980-1984 alcanza luego a Japón y se extiende posteriormente por Europa, aunque con menor intensidad.

En este sector es donde nace la idea del investigador empresario: las compañías dedicadas a la biotecnología o compañías "start-up". El debate se sitúa en el terreno de la patentabilidad, de la propiedad intelectual, de la concesión de licencias. La atribución de una patente de carácter general a Cohen y Boyer, que cubría las técnicas de recombinación genética, generaba una explosión en la bolsa y en la evaluación de la cotización de acciones de estas empresas. El furor biotecnológico empezó a hacer crisis en el período

1984-1985. Pero la tendencia o la caída se cambió pronto y parece haberse alcanzado un equilibrio. Cuando se realizan estimaciones acerca de la cantidad de inversión que se realiza en el sector biotecnológico, hay que tener en cuenta dos valores: el referente a las compañías estrictamente biotecnológicas y el que corresponde a partes más o menos importantes del negocio de las grandes compañías farmacéuticas. Si en el primer caso la información está relativamente disponible, en el segundo, la situación es mucho más complicada, al no separar la mayor parte de las compañías, por ejemplo, los gastos internos de I+D del presupuesto total de I+D, en función de si la inversión es en biotecnologías o en otras actividades. Además, paradójicamente, el gasto interno en I+D para desarrollar productos biotecnológicos de las grandes compañías farmacéuticas puede ser, en valor absoluto, mayor que el gasto de I+D de todas las compañías estrictamente biotecnológicas.

La consecuencia final es que existe una gran cantidad de inversión en biotecnologías y productos biotecnológicos que no se reflejan como inversión en el sector de la biotecnología.. Se trataría de una inversión oculta que en este caso se calcula entre 1.200 – 7.500 millones de dólares en gastos de I+D biotecnológica (Davidson, 1996). Esta cifra se estima partiendo del gasto total en I+D de la industria farmacéutica que, excluyendo al sector biotecnológico y según el Center for Medicines Research (CMR; Carshalton, UK) fue de 30.100 millones de dólares en 1994. Barajando un rango porcentual de gasto interno en I+D de productos biotecnológicos entre el 4-25% del total, concluiríamos que la inversión oculta puede oscilar entre 1.200 – 7.500 millones de dólares. Esta cifra, como se ha indicado antes, podría superar los 7.000 millones \$ USA de gasto en I+D que realizan la totalidad de las empresas puramente biotecnológicas según estimaciones del CMR.

Además de este gasto en I+D oculto, en 1995 las compañías farmacéuticas se gastaron 3.500 millones de dólares en comprar compañías biotecnológicas y 1.600 millones de dólares en licencias o acuerdos de I+D con dichas empresas.

Una encuesta realizada por *Nature Biotechnology* (Davidson, 1996) a las 20 primeras compañías farmacéuticas del mundo (según beneficios) reveló que esa inversión oculta va dirigida a:

- Desarrollo de productos biotecnológicos: proteínas recombinantes, terapia génica y anticuerpos.
- Desarrollo de biotecnologías genómicas y de "screening" basado en receptores. Esta línea de trabajo consiste en utilizar la información que reside en los genes conocidos como base, a partir de la cual, mediante procedimientos informáticos de comparación, seleccionar y diseñar las mejores propiedades génicas de posible aplicación básica o aplicada.

En este contexto, se pone de relieve la trascendencia del Proyecto Genoma Humano que permite a las grandes firmas multinacionales el diseño de sus objetivos que se enmarca claramente en una filosofía de colaboración y cooperación con otras empresas, en general pequeñas e intensivas en conocimientos, o con instituciones académicas. El Director de la empresa Novartis, P. L. Herrling, en un artículo en *Nature* (30 de abril, 1998) señala explícitamente que las "grandes firmas farmacéuticas están dispuestas a aceptar que los descubrimientos fundamentales en el campo científico o técnico tienen lugar fuera de las grandes organizaciones y necesitarán acceder a ellas siempre que complementan o sean esenciales para el esfuerzo interno en investigación".

Se puede hablar de una nueva bioindustria que ha adquirido conciencia de las nuevas demandas y ha comercializado algunos productos clave. Para llegar hasta ello ha sido necesario que las grandes industrias tradicionales tomaran conciencia de la necesidad de diversificar los procedimientos de fabricación y la naturaleza de sus productos. Las

industrias farmacéuticas han sacado provecho de los avances espectaculares llevados a cabo en los campos de la biología celular, la genética y la inmunología. Quizá el mayor aporte de la biotecnología en el sector sea el establecimiento de modelos definidos para patologías específicas (de las que se conoce su base molecular o celular), con mayor poder de diseminación.

El propio dinamismo de la tecnología, en general, y de este sector, en particular, determina que afloren nuevos temas, significativos aunque de distinto calado, en el debate sobre la problemática económica y social de estos desarrollos. Entre ellos cabe mencionar: las patentes sobre los animales transgénicos, el relativo elevado precio de los productos farmacéuticos biotecnológicos y la incidencia cualitativa y cuantitativa de la nueva biotecnología en el empleo. Todas las cuestiones están siendo analizadas por los expertos para seguir progresando en esta senda y abriendo nuevos caminos.

Biotecnología y problemas ambientales

La biotecnología o biotecnologías tiene(n) una clara posibilidad de incidir, positivamente, sobre los problemas ambientales generados por la actividad industrial. Se configura así una biotecnología ambiental o una industria ambiental que aplica las técnicas biotecnológicas en la línea de las tecnologías limpias a las que se hacía referencia anteriormente. El objetivo es un medio ambiente más seguro y de mejor calidad puede lograrse por la vía de la prevención o de la corrección (*biopreservación o bicorrección*) (Muñoz, 1998b).

La primera aproximación persigue el control de los procesos, tecnologías e instrumentos, tratando de incorporar en el terreno de la protección medioambiental todos los requisitos, normativas y procesos que ha venido desarrollando la industria farmacéutica para cumplir con las exigencias de pureza y seguridad de sus productos. En este sentido, son particularmente relevantes la aplicación de métodos de seguimiento de la estabilidad de las células que se utilizan en los biorreactores y el control que permita la satisfactoria eliminación de los contaminantes y residuos peligrosos.

La eliminación de residuos y el reciclado de los desechos se puede acometer por medio de diversas técnicas o instrumentos: mediante el uso de microorganismos específicos de un entorno determinado, procurando explotar sus capacidades de transformación de sustancias que son sustratos para su crecimiento y desarrollo; por medio de enzimas que degradan los eventuales contaminantes o que reducen el nivel de los potenciales contaminantes resultantes de un proceso; por el empleo de organismos genéticamente modificados.

La satisfactoria eliminación de los xenobióticos por medio de la biodegradación requiere una comprensión detallada de los factores que afectan la biodegradación. Los factores ambientales, claves para que se produzca la biodegradación de los xenobióticos, son: i) la concentración del xenobiótico –si ésta es muy alta, pueden existir problemas de toxicidad; si la concentración es muy baja, la velocidad de biodegradación puede estar limitada por la afinidad de las células por esos sustratos-; ii) la presencia de la información genética necesaria y, de acuerdo con ella, de las células con las capacidades metabólicas requeridas; iii) el pH del ambiente y la temperatura del mismo, ya que los dos factores afectan al crecimiento y al metabolismo; iv) la disponibilidad de agua, de forma que se equilibre el potencial osmótico en el interior y exterior celular; v) la disponibilidad de otros nutrientes –necesarios para el crecimiento, como el oxígeno u otros co-metabolitos- y vi) la presencia de otro material orgánico.

El medio ambiente ideal es aquél en el que las condiciones son constantes o, al menos, predecibles y, por lo tanto, permiten el crecimiento y metabolismo de los microorganismos.

Esta situación facilita la realización de estudios a nivel de laboratorio para poder determinar el régimen de tratamiento óptimo para la destrucción de los xenobióticos. Una situación con estas condiciones definidas y constantes ocurre rara vez en la naturaleza, pero puede darse fácilmente en el caso del tratamiento de efluentes industriales, en cuyo proceso se pueden controlar las condiciones físicas y ambientales.

En lo que concierne a los microorganismos utilizados, cabe explorar las posibilidades de disponer de organismos modificados genéticamente en aquellos procesos de degradación de contaminantes plenamente conocidos en sus aspectos bioquímicos. Las estrategias más realistas consisten en: a) manipular genes que codifiquen para enzimas de amplia especificidad, de forma que se extiendan las capacidades catabólicas de los organismos y b) modificar, por manipulación genética, genes estructurales y reguladores implicados en rutas catabólicas definidas, con el fin de superar los problemas generados por la retro-inhibición (feedback) o la inhibición de enzimas catabólicas, o para promover la síntesis de enzimas, o para facilitar la asimilación del xenobiótico en la célula.

La biodiversidad como instrumento tecnológico y comercial

Las industrias farmacéuticas y biotecnológicas muestran un interés creciente por la exploración de productos naturales como eventuales puntos de partida para nuevos medicamentos y sustancias biológicamente activas. La biodiversidad es también un factor clave para comprender, o intentarlo al menos, las complejas relaciones de los usos de aplicaciones de las nuevas biotecnologías con el medio ambiente (véase Muñoz, 1998a).

De acuerdo con ello, los recursos naturales genéticos adquieren un valor estratégico tanto desde el punto de vista tecnológico como desde la visión económica y comercial. Esta confluencia de propiedades e intereses confiere a la conservación de los recursos naturales una situación conflictiva entre los poseedores de esos recursos –generalmente los países en desarrollo- y los usuarios de los mismos: los investigadores y tecnólogos de los países industrializados cuyas carreras y eventual éxito técnico dependen del libre acceso a tales recursos y desvelan preocupaciones ante el movimiento ambientalista y los movimientos de solidaridad ante los países en desarrollo, dos de los colectivos más críticos ante las aplicaciones industriales de la biotecnología.

El Convenio sobre Diversidad Biológica de las Naciones Unidas trata de abordar y resolver esta enrucijada de conflictos. Como Putterman reconocía en un artículo publicado en la revista *Nature* (Putterman, 1994) el "[convenio] no persigue bloquear los recursos genéticos del mundo desde una posición conservacionista extrema". Por el contrario, se orienta a "promover el comercio mundial de estos recursos, y debería generar más investigación y desarrollo". Por lo tanto, debería ser apoyado por la comunidad científica internacional.

Aunque pueda parecer sorprendente, el Convenio, un tratado sobre medio ambiente, se convierte en un documento comercial al delinear a lo largo de los artículos 6 a 14 un amplio plan que permita diseñar las prioridades en conservación a nivel nacional, el uso sostenible de la biodiversidad, la investigación sobre conservación, la educación sobre estos temas y el uso de valoraciones de impacto ambiental. Estos objetivos fundamentales no son, sin embargo, nuevos por cuanto el movimiento conservacionista ha reclamado una atención global sobre estas cuestiones.

Estas actividades cuentan con posibilidad de financiación a través del fondo "*Global Environment Facility*", que es administrado por el Banco Mundial y cuyos recursos superan los 2.000 millones de dólares. El propósito del fondo es financiar los "costes incrementales", es decir los costes adicionales de la protección ambiental que proporciona beneficios globales y que, por lo tanto se proyecta más allá del beneficio local o nacional.

El recurso al potencial genético como una palanca que actúa en el mercado mundial representa una poderosa atracción para los países en vías de desarrollo. Los científicos y las empresas de las sociedades avanzadas deben reconocer el valor de los recursos genéticos y de lo que éstos significan para los países en desarrollo. Con este reconocimiento, los científicos y la industria podrán superar una visión alicorta que les coloca en peligro de dejar pasar una oportunidad ganadora en una perspectiva global y estratégica de la investigación y el desarrollo tecnológico que persiga el futuro más solidario y prometedor respecto al medio ambiente.

Algunas conclusiones

- Las controversias entre la producción industrial y el desarrollo económico frente a las repercusiones que ellos determinan sobre la calidad del medio ambiente alcanzan unas dimensiones cada vez más globales.
- La tecnología es un elemento crítico para profundizar en tales debates, tanto desde una visión global como bajo una perspectiva más internalista, por ejemplo, dentro del propio impulso ambientalista o movimiento conservacionista.
- Las nuevas biotecnologías son fuente de promesas y soluciones, pero también de dificultades cuando abordan los problemas medioambientales causados por la actividad industrial.
- La biodiversidad se configura como un factor tecnológico y comercial de carácter estratégico para superar el conflicto de intereses (tecnológicos y económicos) entre las sociedades avanzadas y los países en desarrollo. ▲

Notas

¹ La soja transgénica obtenida por la empresa multinacional Monsanto y que es resistente a un herbicida fabricado por la misma empresa puede ser reflejo de una ¿buena? estrategia empresarial, pero no es un buen ejemplo de estrategia social. La irrupción en los medios convencionales del caso de la oveja Dolly -escape de noticia científica- en momentos coincidentes con los intereses de una empresa apunta en el mismo sentido negativo. ▲

² Ya ha sido aprobada por el Parlamento europeo y por el Consejo de Ministros de la Unión Europea (septiembre 1998). ▲

Referencias

Abelson, P. H. (1998) "A Third Technological Revolution" (editorial), *Science* **279**, 2019.

Arrow, K., Bolin, B., Constanza, R., Dasgupta, P., Folke, C., Holling, C.S., Jansson, B-O., Levin, S., Mäler, K-G., Perrings, C. y Pimentel, D. (1995) "Economic Growth, Carrying Capacity and the Environment", *Science* **268**, 520-521.

Borrillo, D. (ed.) (1996) *Genes en el Estrado*, Colección Politeya, CSIC, Madrid.

Chafy, R. (1997) "Confronting the culture of progress in the 21st century", *Futures* **29** (7), 633-648.

Callan, B. (1997) "Why production technology is not a measure of the competitiveness in the biotechnologies", *Science and Public Policy* **24** (3), 146-160.

Conway, G. (1997) *The Doubly Green Revolution: Food for All in the 21st Century*. Penguin.

- Davidson, S. (1996) "Hidden biotechnology worth over \$ 7.5 billion a year". *Nature Biotechnology* **14**, 564.
- Delong, E. (1998) "Archeal Means and Extremes" *Science* **280** (24 de abril), 542-543.
- Dower, R., Ditz, D., Fecth, P., Johnson, N., Kozloff, K., Mackenzie, J.J. (1997) *Frontiers of Sustainability*, Island Press, Washington, D.C. y Covelo, Ca.
- Estruch, J. J. (1998) "Plantas resistentes a insectos", *Investigación y Ciencia* (febrero), 46-53.
- Fundación CEFI-GABIOTEC (1996) *Los retos de la biotecnología*, Fundación CEFI, Madrid.
- García Olmedo, F. (1998) *La Tercera Revolución Verde*, Editorial Debate, S.A., Madrid.
- Hays, S. P. (1998) *Explorations in Environmental History, Essays*, University of Pittsburg Press, Pittsburg, Pa.
- Herrling, P. L. (1998) "Maximizing pharmaceutical research by collaboration", en *Nature*, supplement **392** (30 de abril), 32-35.
- Kemp, T. (1969, 1985) *Industrialization in nineteenth-century Europe*, Longman Group Limited, versión en castellano (1987) *La Revolución Industrial en la Europa del Siglo XIX*, Ediciones Martínez Roca, Barcelona.
- Lash, J. (1997) Prólogo, *Frontiers of Sustainability* (World Resources Institute), Island Press, Washington, D.C. y Covelo, Ca.
- Luján, J. L., Moreno, L., Martínez, f. (1996) *La Biotecnología y los expertos*, Instituto de Estudios Sociales Avanzados, CSIC, y Gabinete de Biotecnología, Fundación CEFI, Madrid.
- Madigan, M. T. y Marrs, B. L. (1997) "Extremófilos", *Investigación y Ciencia* (junio), 60-66.
- Morell, V. (1997) "Microbiology's Scarred Revolutionary", *Science* **276** (2 de mayo), 699-702.
- Moreno, L., Lemkow, L., Lizón, A. (1990) "Biotecnología y opinión pública en España" (Informe), Instituto de Estudios Sociales Avanzados, CSIC, Madrid.
- Moreno, L., Lemkow, L., Lizón, A. (1992) *Biotecnología y Sociedad. Percepción y Actitudes Sociales*, MOPT, Madrid.
- Muñoz, E. (1994) *Una visión de la biotecnología: Principios, Políticas y Problemas*, Fondo de Investigación Sanitaria, Madrid.
- Muñoz, E. (1996) "El lugar de la genética en las políticas científicas y tecnológicas", en *Genes en el Estrado*, D. Borrillo, ed., 39-61, Colección Politeya, CSIC, Madrid.
- Muñoz, E. (1997a) *Biotecnología, Industria y Sociedad: El caso español*, Fundación CEFI, Madrid.
- Muñoz, E. (1997b) "Nueva biotecnología y sector agropecuario. El reto de las racionalidades contrapuestas", en *Genes en el Laboratorio y en la Fábrica*, A. Durán y J. Reichmann, coords., 119-140, Editorial Trotta y Fundación 1º de Mayo, Madrid.
- Muñoz, E. (1997c) "Acción y reacción en la percepción pública de la biotecnología", *Libro Verde en la Biotecnología en la Agricultura*, 111-120.
- Muñoz, E. (1997d) "Ética de la investigación y el desarrollo", *Seguridad Nuclear* **5** (IV Trimestre), 9-15.
- Muñoz, E. (1998a) "Bioseguridad y Biodiversidad: su relación con la biotecnología", *Anales de la Real Academia de Farmacia* **LXIV** (2), 261-306.
- Muñoz, E. (1998b) "Environmental Biotechnology and Industry Relationships", Documento preparado para el proyecto BABAS financiado por la Unión Europea (D. J. Bennett, coordinador), Cambridge Biomedical Consultants, Den Haag, Países Bajos.

Muñoz, E., y Bas, F., coords. (1997), *Biotecnología*, Documentos Cotec sobre Oportunidades Tecnológicas nº 10, Fundación Cotec para la Innovación Tecnológica, Madrid.

Pace, N. R. (1997) "A Molecular View of Microbial Diversity and the Biosphere", *Science* **276** (2 de mayo), 734-740.

Putterman, D. M. (1994) "Trade and the biodiversity convention", *Nature* **371**, 553-554.

Ronald, P.C. (1998) "Creación de un arroz resistente a las enfermedades", *Investigación y Ciencia*, enero, 68-73.

Science and Public Policy **23** (3), Junio de 1996.

Simmonds, N. W. (1998) "Shades of Green" (reseña al libro de G. Conway *The Doubly Green Revolution: Food for all in the 21st Century*), *Nature* **391**, 139.

Vitousek, P. M., Ehrlich, P.R., Ehrlich, A. H. y Matson, P. A. (1986) *Bioscience* **36**, 368.

Warcoin, J. (1997) "Las plantas con prohibición de patente europea", *Mundo Científico* **176**, 121-123.

◀ [\[CSIC\]](#) [\[IESA Madrid\]](#) [\[Documentos de Trabajo\]](#) ▲