

BIOLOGÍA Y TECNOLOGÍA

Miguel Ángel Medina Torres
Departamento de Biología Molecular y Bioquímica

1. La Biología: una ciencia joven que se ha ramificado en múltiples especialidades

La Biología es una ciencia empírico-formal que se aproxima al estudio de la *vida* y los seres vivos en el marco conceptual y metodológico de las ciencias físicas y químicas. Se trata de una ciencia joven, todavía en formación, que, sin embargo, ha mostrado un extraordinario desarrollo y diversificación a lo largo del siglo XX, hasta alcanzar su actual posición de privilegio. A las clásicas *Zoología* (estudio de los animales) y *Botánica* (estudio de las plantas) se les ha ido sumando toda una amplia gama de especialidades que cubren todas las escalas naturales de tamaño, desde la astronómica a la microscópica. En la ya larga lista de especialidades, se incluyen la *Microbiología* (en sentido lato, estudio de los microorganismos), la *Biología Celular* (estudio de la estructura, composición y función de la célula viva; anteriormente llamada *Citología*), *Histología* y *Organografía* (estudio de tejidos y órganos, respectivamente), *Fisiologías* y *Patologías* (estudio del funcionamiento de los organismos vivos individuales sanos o enfermos, respectivamente), *Genética* (estudio de los genes y la herencia), *Bioquímica*, *Biología Molecular* y *Biofísica* (estudio de la estructura y función de las células vivas a nivel molecular), *Ecología* (estudio de las poblaciones, comunidades y ecosistemas), *Etología* (estudio del comportamiento de los seres vivos) y *Astrobiología* (estudio de las moléculas de la vida en el espacio), entre otras. Más recientemente, se han incorporado

especialidades de nuevo cuño, como la *Biología Estructural*, la *Bioinformática* y la *Biología de Sistemas*.

En otro lugar (Medina, M. A. 2005), he argumentado cómo y por qué la Biología se ha situado a la vanguardia de todas las ciencias a finales del siglo XX y en lo que va de siglo XXI. En buena medida, la adquisición de esta posición prevalente por parte de la Biología ha ido en paralelo al desarrollo de la gran “revolución de la biología molecular”, considerada una de las tres revoluciones científicas del siglo XX (cf. Sánchez Ron 2000). Pero, ¿hasta qué punto se trata de una auténtica revolución científica, cuando presenta una componente –y una dependencia– tecnológica cada vez más fuerte?

Ciertamente, la Biología puede tomarse como claro paradigma del devenir de la ciencia del siglo XX, al menos de la ciencia que ha triunfado y se ha desarrollado en el siglo XX, una ciencia cuyo progreso está cada vez más estrechamente vinculado al impacto que en ella producen los avances tecnológicos.

2. Ciencia, técnica, tecnología, tecnociencia

Antes de continuar con el tema central que nos ocupa, puede resultar conveniente hacer un *excursus* para comentar ciertos aspectos terminológicos. Ciencia, técnica, tecnología, tecnociencia son términos que no siempre se diferencian apropiadamente. No es este lugar para discutir qué se entiende por ciencia y cómo se delimita desde los puntos de vista epistemológico y filosófico (véase, por ejemplo, el libro *Filosofía de la Ciencia* de Antonio Diéguez (2005)). Según José Sanmartín (1998), una definición ortodoxa de la ciencia la identifica, en sentido amplio, con la tarea practicada con un método característico¹ que tiende al establecimiento y contrastación de teorías mediante las cuales explicar determinadas uniformidades o regularidades (leyes). La ciencia así entendida presenta algunos rasgos característicos. El primero es que las teorías científicas tienden a suministrar explicaciones en sentido estricto,

¹ Qué sea el método científico tampoco se va a discutir aquí, pero –en todo caso– puede merecer la pena apuntar el vivo debate que en los noventa se levantó en torno a la discusión de si el método hipotético-deductivo popperiano es aplicable o no a la Biología.

respuestas a un “¿por qué?” en términos de “porque” y no de “para que”. Un segundo rasgo característico sería el empleo mayoritario de conceptos cuantitativos o susceptibles de cuantificación, esto es, de *conceptos métricos*. Según Sanmartín (1990), un tercer rasgo notable de la ciencia es que nació con vocación de control de una naturaleza considerada, en principio, hostil. Según este criterio, la ciencia pretendería proteger al ser humano frente a la hostilidad de la naturaleza y lo haría controlándola. Estos son los argumentos que emplea Sanmartín (1998):

El ser humano está desarraigado de la naturaleza. Puede que alguna vez estuviera bien adaptado a su medio natural. Pero, aunque parezca contradictorio, me atrevería a decir que, si alguna vez el ser humano estuvo bien adaptado a su entorno natural, no era humano.

El ser humano se ha construido a sí mismo en un continuo proceso de desadaptación de su entorno natural y adaptación simultánea al medio que él mismo ha creado con los productos de la cultura y, en especial, de la técnica [...]. El ser humano ha ido adaptándose a la *mallá supranatural* que ha construido con la cultura y, en especial, con la técnica [...]. Pues el ser humano es más producto de la *tecnoevolución* que de la bioevolución.

Bajo esta perspectiva, la técnica consistiría en el conjunto de habilidades y procedimientos que permiten al hombre controlar la naturaleza. Pero *controlar no supone conocer*. Ese control de la naturaleza que las técnicas proporcionan no supone conocer lo que se está controlando realmente. Justo esto permitiría diferenciar *técnica* y *tecnología*. La tecnología sería siempre una técnica guiada por la ciencia hacia el control de una entidad o un proceso. De esta forma, ciencia y tecnología se complementarían. Pero, en la realidad, muchas veces acaban confundiéndose. Desde luego, la enseñanza de la ciencia no ha conseguido todavía aclarar adecuadamente las diferencias y relaciones entre ciencia y tecnología (cf. Acevedo 1998). A la confusión y el desconcierto han contribuido ciertos historiadores sociales de la ciencia cuando establecen que:

La principal ocupación del científico es encontrar el modo de hacer las cosas, mientras que la del ingeniero consiste en hacerlas. (Bernal 1964).

Tampoco contribuyen a aclarar las confusiones algunas de las orientaciones oficiales de los *currícula* españoles de la E.S.O. (actualmente modificados):

La ciencia y la tecnología tienen propósitos diferentes: la primera trata de ampliar y profundizar el conocimiento de la realidad; la segunda de proporcionar medios y procedimientos para satisfacer necesidades. Pero ambas son interdependientes y se potencian mutuamente. Los conocimientos de la ciencia se aplican en desarrollos tecnológicos; determinados objetos o sistemas creados por aplicación de la tecnología son imprescindibles para avanzar en el trabajo científico; las nuevas necesidades que surgen al tratar de realizar los programas de investigación científica plantean retos renovados a la tecnología. Comprender estas relaciones entre ciencia y tecnología constituye un objetivo educativo de la etapa. (De la Introducción al área de Tecnología, anexo I del RD 1007/1991, MEC).

Acevedo (1998) considera que, dejando aparte los aspectos epistemológicos relacionados con la naturaleza de ciencia y tecnología, en el texto anterior subyace una visión de conjunto jerarquizada en la que la tecnología se subordina a la ciencia como *instrumento útil* para resolver sus necesidades, punto de vista al que habría contribuido *interesadamente* la ciencia (o, más propiamente, los científicos) pero profundamente deformado. Aunque ciertamente la tecnología hace uso actualmente de métodos sistemáticos de investigación semejantes a los de la ciencia y utiliza los hallazgos de ésta, es erróneo identificar la tecnología con una forma de ciencia aplicada subordinada a la ciencia básica (cf. Acevedo 1997). El conocimiento tecnológico es esencialmente *interdisciplinar y pragmático*, orientado hacia una praxis concreta para la resolución de problemas complejos y la toma de decisiones en cuestiones que afectan a la sociedad. Según Fleming (1989), los cuatro principales componentes del conocimiento tecnológico son: i) *Conceptos científicos*, rebajados adecuadamente en su nivel de abstracción para poder adaptarlos a las necesidades y contexto del proyecto de cada diseño tecnológico concreto. ii) *Conocimiento de la problemática*, referente a aspectos de la actividad tecnológica tales como sus impactos sociales y/o medioambientales. iii) *Teoría tecnológica*, considerada como un cuerpo de conocimiento que usa métodos experimentales sistemáticos similares a los de la ciencia pero centrados en el diseño, construcción y comportamiento de artefactos y sistemas tecnológicos y que contrapone a la racionalidad científica (que emplea como criterio de validez el que una teoría sea verdadera o verosímil) una *racionalidad tecnológica* más utilitaria (utilizando como criterio de validez el que una teoría resulte útil y funcione en la práctica). Y, iv) *pericia técnica o know-how*, entendida como procedimientos o técnicas específicas con instrumentos y máquinas acompañados de un

conjunto de criterios pragmáticos que se basan en un conocimiento tácito difícil (cuando no imposible) de codificar.

En todo caso, parece evidente que las relaciones entre ciencia y tecnología se han intensificado y estrechado mucho desde la segunda mitad del siglo XX y que estas relaciones han cambiado de orientación:

Los criterios clásicos de racionalidad científica están empezando a ser desplazados por los de racionalidad tecnológica. La ciencia, que a finales del siglo XIX, se había apropiado jerárquica e interesadamente de la tecnología, está cada vez más al servicio de ésta, hasta el punto que un siglo después, en los albores del XXI, parece estar produciéndose un cambio del paradigma de Investigación y Desarrollo (I+D) por otro nuevo que es más Desarrollo e Investigación (D+I). (Acevedo 1998).

El complejo entramado de la ciencia y la tecnología contemporáneas, su *fusión* y *con-fusión*, ha venido a ser designado por el término *tecnociencia*, que tiene una carga conceptual especial según Manuel Medina (s. f.), pues:

No sólo indica que con el paso de la ciencia académica a la ciencia gubernamental e industrial, sobre todo en el siglo XX, ciencia y tecnología han llegado a ser prácticamente inseparables en la realidad. También señala una nueva imagen de la ciencia y la tecnología que los actuales estudios de ciencia y tecnología han ido destacando frente a las concepciones tradicionales. Una de las ideas características es que la ciencia no se puede reducir a los científicos ni la tecnología a los tecnólogos, sino que ambas forman parte de complejas redes junto con otros agentes y entornos simbólicos, materiales, sociales, económicos, políticos y ambientales. [...] La clave del éxito tecnológico de la ciencia reside en que las teorías científicas teorizan, precisamente, técnicas exitosas. La verdad de la representación teórica corresponde a la efectividad operativa.²

3. La Biología: ¿ciencia, tecnociencia?

Hecho este largo *excursus* en torno a cuestiones terminológicas, volvamos la mirada hacia la Biología y preguntémosnos en el contexto de lo comentado y discutido hasta aquí: ¿es la Biología una ciencia o una

² Es decir, que el desplazamiento de los criterios de racionalidad científica por los de racionalidad tecnológica apuntado por Acevedo se estaría imponiendo en la práctica y, más aún, estaría contribuyendo al propio éxito de la ciencia actual.

tecnociencia? ¿Hasta qué punto los avances tecnológicos influyen en el progreso de la Biología y éstos en aquéllos?

Basta con echar una mirada retrospectiva y diacrónica al devenir de la Biología a lo largo del siglo XX para apreciar que se ha producido un creciente y acelerado proceso de “tecnocientificación”. Ello no quiere decir que no quede espacio para otros procedimientos más “clásicos” para hacer ciencia básica “pura” en el dominio de la Biología.

A diferencia de las ciencias fisico-químicas *duras*, la Biología carece de un cuerpo de doctrina teórica suficiente. Mientras que las teorías sobre la naturaleza del Universo impregnan al campo de la filosofía y la física teórica es una disciplina plenamente admitida en los medios académicos, no puede decirse lo mismo del estatuto teórico de la Biología. Consciente de esta debilidad, la Unión Internacional de Ciencias Biológicas organizó en los veranos de 1966, 1967 y 1968 una serie de simposios con el objetivo de explorar la posibilidad de establecer un programa de conceptos y métodos que permitiría iniciar con plena seguridad el camino hacia una biología teórica (cf. Waddington *et al.* 1976). Cerca de 40 años después, a pesar del empuje y las notables contribuciones de científicos de la talla de Waddington, Thom, Maynard Smith, Goodwin y Kauffman, la plena consecución de dicho objetivo está lejos de alcanzarse.

El siglo XX todavía vio la aparición de una nueva ciencia biológica fundada en sus orígenes en el procedimiento –bastante desligado de los últimos avances técnicos– de la *observación crítica*. La consolidación de esta nueva ciencia del comportamiento o *Etología* fue refrendada con la concesión del Premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1973 a tres de sus pioneros (Karl von Frisch, Nikolaas Tinbergen y Konrad Lorenz). El siglo XX todavía vio el trabajo callado y solitario de biólogos independientes, capaces de aportar contribuciones tan estimables como los estudios genéticos de Bárbara McClintosh en relación con los *transposones*. Sin embargo, hay que reconocer que la investigación biológica ha sido –y es cada vez más– de una forma abrumadoramente mayoritaria una investigación colectiva, producto del esfuerzo conjunto de *grupos de investigación*, y una investigación muy dependiente de técnicas más o menos sofisticadas (y, por tanto, *cara*). En definitiva, las viejas fronteras entre ciencia y tecnología han ido desapareciendo, también en

Biología. Los grandes programas de investigación biológica, tales como los proyectos genoma, tienen cada vez más que ver con la obtención masiva de datos mediante el empleo de gran instrumentación que con el establecimiento y contrastación de teorías. La investigación biológica tiende a estar cada vez menos conducida por hipótesis y cada vez más guiada por la adquisición masiva *a priori* de “resultados”, que posteriormente tienen que ser reelaborados e interpretados en busca de alguna “utilidad”.

4. El impacto de los avances tecnológicos en Biología: El ejemplo de lo que podemos “ver”

Con la ciencia instrumental la humanidad ha escapado al confinamiento impuesto por sus limitaciones sensoriales y ha extendido prodigiosamente su comprensión de la realidad física. Literalmente, *todos nuestros sentidos han sido ampliados por la ciencia*. Para el ser humano, es el sentido de la vista el que, con diferencia, le aporta más información acerca del mundo sensible. Pues bien, un simple repaso a algunos hitos técnicos y tecnológicos que han multiplicado nuestra capacidad para “ver” puede ilustrar claramente cómo dichos avances han contribuido a generar saltos cuánticos en el conocimiento biológico.

Antes de la invención del primer *microscopio* por *Leeuwenhoek* a finales del siglo XVII, el único mundo vivo conocido (y, por tanto, susceptible de ser estudiado) era el mundo macroscópico de los seres visibles con nuestra vista o, a lo sumo, con ayuda de unas lentes de aumento. Las primeras observaciones de simples gotas de agua de charca mostraron al sorprendido y admirado *Leeuwenhoek* todo un microcosmos pleno de vida, seres vivos diminutos hasta entonces ni siquiera sospechados. La observación y descripción de unos muy móviles “*animáculos espermáticos*” quedaron registradas como una comunicación científica de *Leeuwenhoek* a la Royal Society británica en 1679.

La implementación de nuevas técnicas de tinción, así como de obtención, manipulación y preservación de muestras histológicas, posibilitaron el notable impulso que experimentaron la Citología, Histología y Organografía a finales del siglo XIX y durante el primer cuarto del siglo XX. La disponibilidad de moléculas marcadas

radiactivamente para su uso como trazadores, así como la de métodos de separación y determinación cuantitativa de dichas muestras radiactivas fueron esenciales para empezar a “ver” la biomoléculas y para la cimentación de la Bioquímica Metabólica. La introducción de las técnicas de microscopía electrónica propició un nuevo salto cualitativo en el conocimiento detallado de las estructuras biológicas con una resolución subcelular antes inalcanzable. Las técnicas de *difracción de rayos X* y de *resonancia magnética nuclear* y el empleo de métodos de *modelización molecular* permiten la reconstrucción de la estructura espacial de macromoléculas con una resolución prácticamente atómica. Por otra parte, los rayos X primero y los métodos de imagen por resonancia magnética mucho después nos han permitido “ver” el interior del organismo, de forma completamente inocua en el segundo caso. Es más, la resonancia magnética y diversas *tomografías* están empezando a permitirnos “ver” el funcionamiento del organismo. La *microscopía óptica láser confocal* está permitiendo obtener imágenes celulares y subcelulares con un grado de nitidez sorprendente y posibilita la reconstrucción de imágenes tridimensionales mediante el barrido y análisis de imágenes en distintos planos focales de una misma muestra. En las últimas décadas, diversos progresos tecnológicos están posibilitando, por primera vez, el estudio real de moléculas individuales. Los métodos de medida habituales implican a gran número de moléculas y, por tanto, las propiedades dinámicas son promediadas y no pueden ser observadas. La reciente implantación y desarrollo de técnicas de detección y análisis de moléculas individuales está permitiendo el acceso a ese tipo de información que, hasta hace poco, permanecía oculta. Estas técnicas permiten la visualización y manipulación de moléculas aisladas sin dañarlas. El análisis de moléculas aisladas está actualmente dominado por tres tipos de aproximaciones metodológicas diferentes: la técnica electrofisiológica del pinzamiento zonal de membranas, la microscopía de fuerza atómica y métodos ópticos basados en la fluorescencia (cf. M. A. Medina 2002).

Desde la observación y estudio exclusivamente de lo que podían ver nuestros ojos hasta el momento actual en que podemos “ver”, manipular y estudiar moléculas una a una hay un enorme abismo que sólo ha sido posible superar gracias a la decisiva contribución de los avances tecnológicos.

5. Tecnologías que están transformando la Biología de principios del siglo XXI

Más arriba, se hacía mención a la revolución científica de la biología molecular. En otro lugar (M. A. Medina 2005), he defendido que dicha revolución científica ha devenido en revolución tecnológica, una revolución que –de facto– no ha concluido, pues a la "primera revolución" del DNA recombinante de los años setenta, le han sucedido al menos otras "segunda y tercera revoluciones" marcadas por los hitos técnicos de la implantación de los procedimientos de la *mutagénesis dirigida* y de la *reacción en cadena de la polimerasa (PCR)* desde mediados de los ochenta y la implantación durante la última década de los análisis "masivos" de información genética con las herramientas de la *Bioinformática* y los estudios al unísono de centenares a miles de genes, transcritos, proteínas o cortes de tejidos mediante el empleo de *micromatrices*.

La "revolución" sigue en pie y mantiene a la Biología en la frontera del conocimiento científico. Y una vez más son avances tecnológicos concretos los que soportan y promocionan este continuado y exitoso progreso de la Biología. Muy recientemente, una de las revistas científicas de mayor difusión, *The Scientist*, ha dedicado un número de forma casi monográfica a la descripción y análisis de siete tecnologías que actualmente están transformando las ciencias biológicas (cf. VV. AA. 2005). Es fácil y razonable argumentar que "no están todas las que son" pero, sin duda, "son todas las que están". Puede resultar ilustrativo hacer un breve repaso a cada uno de estos "siete magníficos".

El secuenciador automático de DNA. En 1975 Frederick Sanger estableció el método de "terminación de la cadena" para la secuenciación de fragmentos de DNA, invención por la que años después se haría merecedor de su segundo premio Nobel. Once años después se publicó un procedimiento para la secuenciación automática basado en el método de Sanger (cf. Smith *et al.* 1986). La implementación del secuenciador automático permitió el comienzo del Proyecto Genoma Humano en 1990 y el desarrollo y conclusión de múltiples proyectos genoma, con infinidad de potenciales aplicaciones futuras, incluida una "medicina a la carta" basada en datos de secuencias de cada individuo.

BLAST. Una vez clonado y secuenciado un nuevo gen, en ausencia de pistas acerca de su función puede resultar difícil saber cómo iniciar su estudio. Un enfoque ampliamente utilizado es buscar otras secuencias similares e inferir función a partir de la homología. Hoy en día esto se puede hacer *online* desde cualquier ordenador personal conectado a la red pidiendo a un servidor localizado en el NCBI (*National Center for Biotechnology Information*, Bethesda, Maryland, USA) que compare la secuencia particular en la que estamos interesados con todas las depositadas en GenBank, una gigantesca base de datos de DNA que a finales de 2004 albergaba más de 40 millones de secuencias, totalizando 44,500 millones de nucleótidos. Esta operación de comparación es trivial y se completa en cuestión de segundos gracias a la potencia de los procesadores usados por NCBI para tal fin y gracias al empleo de un programa informático “viejo” pero muy exitoso: *BLAST* (*Basic Local Alignment Search Tool*) (cf. Altschul *et al.* 1990). Actualmente existen más de una docena de variantes de *BLAST* y otros programas con aplicaciones específicas en el manejo y extracción de información potencialmente útil de las secuencias génicas.

Las micromatrices de DNA. La idea básica es disponer de múltiples secuencias de DNA sobre un soporte de pequeña superficie para poder realizar análisis de expresión génica. Básicamente, se han desarrollado y progresado dos procedimientos alternativos: la fabricación de matrices por un método fotolitográfico y la generación de los mismos mediante el depósito de minúsculas gotas (con volúmenes en el rango de los picolitros) de suspensiones de DNA (cf. Fodor *et al.* 1991 y Schena *et al.* 1995). En la actualidad, hay disponibles micromatrices de gran densidad que en superficies menores a los 100 centímetros cuadrados tienen dispuestos decenas de miles de fragmentos de DNA representativos del genoma completo de un organismo. Inspirados en el mismo principio, también se han desarrollado matrices de proteínas y tejidos. Las micromatrices de DNA han causado un notable impacto en el desarrollo de los estudios de biología molecular centrados en el análisis de la expresión génica y genotipado, induciendo un desplazamiento desde la investigación guiada por hipótesis a una investigación conducida por resultados obtenidos a priori. En el futuro, la tecnología de las micromatrices facilitará la implementación de una medicina molecular personalizada.

El ensayo Y2H. El ensayo Y2H (*yeast two-hybrid*), o de dos híbridos en levadura, es un sistema genético implementado a finales de los ochenta (cf. Fields y Song 1989) que permite la detección *in vivo* de interacciones proteína-proteína, sin la necesidad de disponer de anticuerpos o proteínas purificadas. Este procedimiento experimental ha permitido iniciar los estudios de las redes de interacción entre proteínas funcionales (*interactomas*), que luego pueden ser analizadas topológicamente facilitando la integración con otros datos biológicos y la generación de modelos. Entre las aplicaciones prácticas de estos estudios de los interactomas, hay fundadas esperanzas en que puedan revelar nuevas dianas terapéuticas.

MALDI. Desarrollada a partir de mediados de los ochenta (cf. Karas *et al.* 1985), es una técnica de ionización que posibilita el análisis por espectrometría de masas de biomoléculas de gran tamaño, abriendo así las puertas del mundo biológico a este potente y resolutivo sistema de análisis. La técnica de espectrometría de masas MALDI-TOF (*Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization-Time of Flight*) ha permitido en los últimos años el desarrollo de la *proteómica* a gran escala. Se está asentando como un procedimiento estándar para la identificación de proteínas, con aplicaciones concretas en la identificación de biomarcadores y posible uso diagnóstico. Ha facilitado también el impulso de la *metabolómica* y la *metabonomía*.

Productos “microfluidicos”. Basados en procedimientos de miniaturización desarrollados a partir de los años setenta (cf. Ferry *et al.* 1979), en los últimos años se han construido auténticos laboratorios de investigación sobre microcircuitos (los denominados “*lab-on-a-chip*” (cf. McClain *et al.* 2003)) que están incorporando las ventajas de la miniaturización (mayor rapidez, menor tamaño de muestras, posibilidad de múltiples ensayos paralelos, mínimo gasto de reactivos) a la investigación biológica, con un enorme potencial para transformar la biomedicina posibilitando la implantación de nuevos procedimientos de detección médicos y disminuyendo sensiblemente los costes del desarrollo de fármacos.

La trampa óptica. Consiste en un método desarrollado en 1986 (cf. Ashkin *et al.* 1986) que emplea la luz láser para genera una trampa óptica

(“*optical tweezer*”) que posibilita manipular proteínas individuales *in vitro* y, por tanto, estudiar el comportamiento individual de estas moléculas.

6. Retos y riesgos

No resulta exagerado afirmar que la Biología está impulsando todos los ámbitos del quehacer humano: diagnóstico, pronóstico y prevención de enfermedades en los seres humanos, animales y plantas, nuevos fármacos, vacunas y terapias, nuevas cepas de organismos vivos de uso agrícola, ganadero, forestal e industrial, bio-remediación y un largo etcétera. En campos tan alejados de la actividad científica como son los temas judiciales, se han incorporado las aplicaciones de técnicas de la revolución molecular como valor de prueba. Parece indudable que el dominio tecnocientífico de la Biología ha contribuido decisivamente al proceso de “tecnocientificación” global de la cultura en el que nos hallamos inmersos, proceso que muchos identifican con el origen de nuestra *cultura del riesgo*. Las innovaciones tecnocientíficas dan paso a lo que se ha dado en llamar *nuevas tecnologías*. Éstas, destinadas inicialmente a solventar problemas humanos, sociales o ambientales concretos, son, a su vez, fuentes de nuevos problemas y potenciales riesgos, que exigen profundizar en la “tecnocientificación”, en una espiral sin aparente fin ni retorno. Así lo advierte Manuel Medina:

Por otra parte, la gestión de los eventuales riesgos derivados de una producción tecnocientífica desenfrenada supone una expansión de la evaluación de impactos y riesgos prácticamente irrealizable. Cuando el mínimo descontrol corre el riesgo de convertirse en una catástrofe, es explicable que se acabe identificando la gestión y solución racional con un control tecnocientífico aún más absoluto. Sin embargo, la tecnocientificación total completamente exenta de fallos no ha llegado a realizarse ni es prácticamente realizable a gran escala. (M. Medina s. f.).

El modelo tecnocientífico tiende de forma compulsiva, por su propia dinámica, a la transformación de la sociedad y de la naturaleza en sistemas tecnocientíficos, en entramados predecibles y controlables. Este proceso compulsivo conlleva un serio riesgo cultural global: el de la *unidimensionalidad tecnocientífica*, que tiende a ser excluyente e incompatible con otros sistemas culturales, a los que puede abocar a ser absorbidos o marginados.

La propia comunicación entre científicos y de éstos con la sociedad se enfrenta a un fenómeno que es, en sí, un claro riesgo. Se percibe una tendencia creciente a que parte del conocimiento producido no se difunda por la comunidad científica tan libremente como antes (cf. Ferné 1989). El secretismo característico de las investigaciones industriales y militares se está extendiendo al ámbito de la ciencia académica.

Buena parte de la Biología del siglo XX se centró en intentar reducir los fenómenos biológicos al comportamiento de las moléculas. Este enfoque, esencialmente *reduccionista*, ha tenido un indudable éxito y ha contribuido de forma definitiva al despegue de la Biología hacia su actual posición privilegiada en el dominio de las ciencias. Sin embargo, a pesar de este enorme éxito, las funciones biológicas raramente pueden ser atribuidas a una molécula individual concreta. Al contrario, la mayoría de las funciones biológicas son el resultado de la interacción de múltiples componentes (en términos matemáticos, variables), algunas de ellas no identificables con moléculas específicas. Esto ha llevado a prestigiosos biólogos moleculares a postular la necesidad de una transición desde el enfoque molecular a un enfoque modular, a una visión más integradora, sistémica, en una palabra, más *holista* (cf. Hartwell *et al.* 1999). En este sentido, la irrupción con gran fuerza en los últimos años de la denominada *Biología de Sistemas* es un claro signo de que las cosas están cambiando.

Todas las disciplinas evolucionan. En el siglo XX esta evolución sufrió una aceleración y una fuerte tendencia hacia la hiperespecialización. Como ha pasado en el dominio de la Biología, esta tendencia ha resultado ser extraordinariamente fecunda y exitosa. Pero, en contrapartida, el conocimiento se ha fragmentado *ad infinitum* en gran cantidad de disciplinas compartimentadas, esencialmente autónomas unas de otras, de forma tal que ningún individuo puede dominar la dispersión y se hace cada vez más improbable que pueda dominar la totalidad de una sola de las especialidades y llegue siquiera a entender los fundamentos de cualquier otra. Esta situación ha supuesto una profunda ruptura entre la realidad de la existencia de la ciencia y la “idea de la ciencia” como un “estado superior del saber humano” (cf. Auroux 1990). Esta evolución hacia la superespecialización de los científicos, agravada por la creciente sofisticación de las técnicas en que sus especialidades se soportan, ha conducido finalmente a un movimiento de reacción que se está

traduciendo en el acercamiento entre ciertas disciplinas y en la puesta en común de ciertos conceptos. Un primer estadio de esta tendencia viene representado por la *multidisciplinariedad* o *pluridisciplinariedad*, bien vertical, bien horizontal: asociación de distintas disciplinas para afrontar un objetivo o problema común. Cuando, para atender a dicho objetivo común, las disciplinas se ven abocadas a cooperar y a encontrar un “lenguaje” común de entendimiento, surge la *interdisciplinariedad*. Algunas de las disciplinas biológicas emergentes en los últimos años surgen de este terreno de confluencia cooperativa entre especialidades y pueden, por tanto, ser consideradas disciplinas intrínsecamente interdisciplinarias (como el caso paradigmático de la *bioinformática*). Si la pluridisciplinariedad y la interdisciplinariedad representan un progreso en la medida en que establecen las líneas maestras sobre las que cimentar el reencuentro entre disciplinas, el objetivo natural al que deberían dirigirse es a la *unidad del conocimiento*, una propuesta ya hecha pública en 1955 por el premio Nobel y “padre” de la revolución mecanocuántica Niels Bohr (cf. Bohr 1955 y más recientemente planteada por E. O. Wilson, el “padre” de la Sociobiología (cf. Wilson 1999). En este contexto, Jean Piaget introdujo en 1967 el concepto de *transdisciplinariedad*:

Es esperable que a la etapa de relaciones interdisciplinarias suceda una etapa superior que sería “transdisciplinar”, la cual no se contentaría con atender a las interacciones o reciprocidades entre especialidades, sino que situaría estas relaciones dentro de un sistema total sin fronteras establecidas entre las disciplinas. (Piaget 1967).

Posteriormente, otros autores, muy particularmente Edgar Morin (1994) y Basarab Nicolescu (1996), se han esforzado en precisar y desarrollar la noción de transdisciplinariedad. Por la propia naturaleza de su objeto de estudio –los seres vivos y la vida–, la Biología se encuentra en una posición de privilegio para contribuir también al avance de estas tendencias integradoras. Frente al desarrollo acelerado e invasivo de las tecnociencias, la aplicación del espíritu transdisciplinar a todas las dimensiones de la vida humana podría ser un medio efectivo de cambiar la orientación de nuestra civilización.

REFERENCIAS

- ACEVEDO, J. A. (1997), "Cómo puede contribuir la Historia de la Técnica y la Tecnología a la educación CTS", en R. Jiménez y E. Wamba (eds.), *Avances en la didáctica de las ciencias experimentales*, Huelva: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Huelva. pp. 287-292.
- (1998), "Tres criterios para diferenciar entre Ciencia y Tecnología", en E. Banet y A. de Pro (eds.), *Investigación e innovación en la enseñanza de las ciencias, Vol I*, Murcia: DM, pp. 7-16.
- ALTSCHUL, S. F. *et al.* (1990), "Basic local alignment search tool", *Journal of Molecular Biology*, 215: 403-410.
- ASHKIN, A. *et al.* (1986), "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles", *Optical Letters*, 11: 288-290.
- AUROUX, S. (1990), "Science", en S. Auroux (ed.), *Les notions philosophiques. Dictionnaire*, Paris: Presses Universitaires de France, pp. 2312-2319.
- BERNAL, J. D. (1964), *Science in History*, London: Watts.
- BOHR, N. (1955), *The Unity of Knowledge*, New York: Doubleday.
- DIÉGUEZ, A. (2005), *Filosofía de la ciencia*, Madrid: Biblioteca Nueva y Universidad de Málaga.
- FERNÉ, G. (1989), "La ciencia, una nueva mercancía", *Mundo científico*, 9: 564-571.
- FIELDS, S. & SONG, O. (1989), "A novel genetic system to detect protein-protein interactions", *Nature*, 340: 245-246.
- FLEMING, R. W. (1989), "Literacy for a technological age", *Science Education*, 73: 391-404.
- FODOR, S. P. *et al.* (1991) "Light-directed, spatially addressable parallel chemical synthesis", *Science*, 251: 767-773.
- HARTWELL, L. H. *et al.* (1999), "From molecular to modular cell biology", *Nature*, 402: C47-C52.
- KARAS, M. *et al.* (1985), "Influence of the wavelength in high-irradiance ultraviolet laser desorption mass spectrometry of organic molecules", *Analytical Chemistry*, 57: 2935-2939.
- McCLAIN, M. A. *et al.* (2003), "Microfluidics devices for the high-throughput chemical analysis of cells", *Analytical Chemistry*, 75: 5646-5655.

- MEDINA, M. (s. f.), “Tecnociencia”, disponible online en: <http://www.ub.es/prometheus21/articulos/archivos/Tecnociencia.pdf>
- MEDINA, M. A. (2002) “Técnicas de detección y análisis de biomoléculas individuales”, *Encuentros en la Biología*, 78: 3-4.
- (2005), “La Biología: Una ciencia para el siglo XXI”, en J. M. Atencia y A. Diéguez (coords.), *Tecnociencia y cultura a comienzos del siglo XXI*, Málaga: Universidad de Málaga, pp. 227-252.
- MORIN, E. (1994), “Interdisciplinarité et transdisciplinarité”, *Transversales, Science, Culture*, 29: 4-8.
- NICOLESCU, B. (1996), *La transdisciplinarité*, Rocher, Paris.
- PIAGET, J. (1967), “Le système et la classification des sciences”, en *Logique et connaissance scientifique*, Paris: Gallimard, pp. 1151-1224.
- SÁNCHEZ-RON, J. M. (2000), “La ciencia a través de la historia”, en P. García-Barreno (ed.) *La ciencia en tus manos*, Madrid: Espasa, pp. 57-74.
- SANMARTÍN, J. (1990), *Tecnología y futuro humano*, Barcelona: Anthropos.
- (1998), “La tecnología en la sociedad de fin de siglo”, *Teorema*, XVII/3.
- SCHENA, et al. (1995), “Quantitative monitoring of gene expression patterns with a complementary DNA microarray”, *Science*, 270: 467-470.
- SMITH, L. M. et al. (1986), “Fluorescence detection in automated DNA sequence analysis”, *Nature*, 321: 674-679.
- TERRY, S. C. et al. (1979), “A gas chromatographic air analyzer fabricated on silicon wafer”, *IEEE Transactions on electronic Devices*, 26: 1880-1886.
- VV. AA. (2005), *The Scientist*, 19, issue 16.
- WADDINGTON, C. H. et al. (1976), *Hacia una Biología Teórica*, Madrid: Alianza Editorial. [Traducción del texto original en inglés publicado en 1968 por Edinburgh University Press].
- WILSON, E. O. (1999), *Consilience. La unidad del conocimiento*, Barcelona: Galaxia Gutenberg.