

Tendencias de futuro de la ingeniería genética y la biotecnología

Future Trends in Genetic Engineering and Biotechnology

María Rosario H. Sánchez Morales

Palabras clave

Biotecnología
• Efectos sociales
• Ingeniería genética humana

Key words

Biotechnology
• Social Effects
• Human Genetic Engineering

Resumen

Los desarrollos en ingeniería genética humana y biotecnología han tenido y tienen evidentes alcances para la sociedad. Hecho que se explica porque sus herramientas de trabajo son gametos, embriones, células germinales, genes, etc. y, junto a usos benefactores, pueden coexistir usos inapropiados. Las secuelas para la especie humana, la organización social y para el propio modelo de sociedad son importantes. En este texto se presentan los principales resultados de una investigación acometida por el Centro de Investigaciones Sociológicas en el año 2021 en el que, a través de una encuesta Delphi, se consultó a 25 expertos en la materia, quienes nos proyectaron sus principales líneas de evolución que, como veremos, tienen notables repercusiones sociales.

Abstract

Developments in Human Genetic Engineering and Biotechnology have had and continue to have a strong impact on society. This is due to the fact that their working tools include gametes, embryos, germ cells and genes, which may have both beneficial and inappropriate uses. These uses have significant consequences for the human species, for social organisation and for the very model of society. This text presents the main results of research undertaken by the Centre for Sociological Research (Centro de Investigaciones Sociológicas) in 2021 whereby a Delphi survey was administered to 25 experts in the field who identified the main areas of development, which have notable social repercussions.

Cómo citar

Sánchez Morales, María Rosario H. (2024). «Tendencias de futuro de la ingeniería genética y la biotecnología». *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, 187: 147-158. (doi: 10.5477/cis/reis.187.147-158)

La versión en inglés de esta nota de investigación puede consultarse en <http://reis.cis.es>

María Rosario H. Sánchez Morales: UNED-CIS | msanchez@poli.uned.es



INTRODUCCIÓN

El objetivo de la ingeniería genética humana es modificar la información genética (ADN) que se incluye en las células, generando moléculas de ADN recombinante. En el campo de la salud, la ingeniería genética no humana (biotecnología) permite la fabricación de productos farmacológicos, así como de vacunas (varias de las vacunas contra la COVID-19 fueron generadas por esta vía) o antibióticos. Destacan la farmacogenética (Prior-González *et al.*, 2011: 41-49) y la farmacogenómica (Pierna-Alvárez *et al.*, 2019: 147-154), que tratan de identificar los medicamentos que se ajustan mejor a los perfiles genéticos de los enfermos

La biotecnología, es definida por la Federación Europea de Biotecnología como:

[...] el uso integrado de la bioquímica, la microbiología y la ingeniería genética para poder aplicar las capacidades de microorganismos, células cultivadas animales o vegetales o partes de estos en la industria, en la salud o en los procesos relacionados con el medio ambiente.

Habiendo sido la solución para mitigar el SARS-CoV-2.

Comencemos por la ingeniería genética humana. Su aplicabilidad ha causado dilemas éticos de relevancia, en tanto en cuanto caben intervenciones en los seres humanos, tanto con fines terapéuticos (diagnósticos genéticos, terapias celulares...) como de un posible perfeccionamiento de la raza (transhumanismo)¹ (Feito-Grande, 2010: 73-91). Enfrentándonos a un modelo de medicina predictiva, regenerativa e individualizada, en un contexto de convergencia tecnológica, con un papel fundamental de las tecnologías de la información y la comunicación. Especial notabilidad adquieren, como decíamos, los diag-

nósticos genéticos (preimplantacionales, prenatales, posnatales), las terapias celulares (la más prometedora posiblemente sea la terapia génica), la utilización de células troncales (terapia celular) y, eventualmente, la clonación con fines terapéuticos. Debiéndose contextualizar, en cualquier caso, dentro de una ética de la salud pública.

Para estudiarlo y discernir sobre sus posibilidades a futuro, a lo largo del año 2021 el Centro de Investigaciones Sociológicas (CIS) realizó un *Estudio Delphi sobre Tendencias en Ingeniería Genética y Biotecnología* (CIS, 2021), del que expondremos sus principales resultados, comparándolo con estudios previos del Grupo de Estudio sobre Tendencias Sociales (GETS), no sin antes detallar la metodología empleada. Lo haremos así por ser los únicos disponibles para el caso español. Permite darles continuidad y observar las tendencias de evolución a lo largo de tres décadas.

METODOLOGÍA

Tal como se detalla en la ficha técnica del estudio del CIS:

La metodología Delphi se ha utilizado en este caso para determinar la probabilidad de que acontezcan determinados eventos y cambios, y para evaluar su importancia en un horizonte temporal estimado en una década para las grandes tendencias, y en lapsos más precisos para cada una de las innovaciones específicas consideradas (horizontes 2025, 2030, 2035, 2050) (CIS, 2021).

Se juzgó la más adecuada al efecto del estudio por disponer en nuestro país de expertos de la más alta cualificación en este ámbito, por lo que se elaboró una *Encuesta Delphi sobre tendencias en Ingeniería genética y Biotecnología*. Los pasos metodológicos seguidos fueron: 1) la discusión del cuestionario por el equipo de investigación; 2) la obtención de pruebas de contrastación; y 3) el envío al grupo de expertos. Entre los seleccionados había profesores de

¹ El transhumanismo es una ideología que propone construir un ser humano, más sano, inteligente y liberado de todas las patologías, incluyendo la muerte.

universidad, científicos, médicos e investigadores de primer nivel con alta especialización en el área.

Se preparó, en buena medida, a partir de informaciones obtenidas en los estudios previos del GETS. Una vez perfilado, se llevaron a cabo varias entrevistas-piloto, con la finalidad de verificar la idoneidad de las preguntas y de los diversos asuntos planteados (entre el 20 y el 28 de febrero de 2021). Constaba de diferentes modalidades de preguntas. En algunas se pidió el pronóstico o la tendencia respecto del tema considerado, indicándose, en su caso, junto a la pregunta y como orientación para los expertos, el dato actualizado sobre lo consultado en la fecha del envío de la primera circulación de los cuestiona-

rios. En dos apartados de estos se pedía la seguridad en sus respuestas en una escala del 1 (mínima) al 5 (máxima), así como la importancia estimada de los efectos sociales de los sucesos en la misma escala. Además, sobre cada uno de los mismos podían plantear observaciones, comentarios...

Había otras preguntas en las que se trataban temas generales; con preguntas abiertas precodificadas que facilitaron las respuestas en la segunda circulación de las encuestas. El tiempo estimado de cumplimiento de las mismas, dada su complejidad, se estimó en torno a 40 minutos. La primera se envió entre el 15 y el 18 de marzo de 2021 a 138 expertos, obteniéndose 25 respuestas.

TABLA 1. Nivel de cobertura de las encuestas

Número total de encuestas teóricas (primera circulación)	Número total de respuestas primera circulación	% de respuestas	Número de respuestas de segunda circulación	% de respuestas
138	25	18,1	25	100

Fuente: CIS (2021). Estudio Delphi sobre tendencias en Ingeniería Genética Humana y Biotecnología.

Fueron analizados, estableciéndose la mediana, el primer y el tercer cuartil, además de preguntarles por la seguridad en la previsión de sus respuestas y la importancia y repercusión de los eventos. Con las informaciones de la primera circulación se elaboró la encuesta de la segunda circulación. Incluyéndose las respuestas de los expertos, junto con los comentarios generales de cada una de las previsiones. Asimismo, se recogían sus primeras estimaciones, solicitándoles que las confirmasen o las modificasen, en función de las contestaciones del resto de los participantes.

El segundo se les remitió entre los días 8 y 21 de junio, adjuntándose las respuestas personales de la primera circulación, así

como un listado de las principales observaciones emitidas por el resto del grupo. A la segunda circulación respondieron 25 expertos, finalizando la recogida de estos el 14 de julio. Una vez recepcionados se obtuvieron, entre el 15 y el 30 de julio, los datos (medianas, primer y tercer cuartil de las respuestas).

Entre los cuestionarios de la primera y segunda circulación se constataron cambios y matizaciones de las previsiones y de los horizontes temporales, en relación con las apreciaciones iniciales vertidas por los expertos. El rigor de esta investigación es una garantía de su fiabilidad, posibilitando plantear tendencias y proyectar sus repercusiones sobre las sociedades y las personas a corto, medio y largo plazo.

TENDENCIAS DE EVOLUCIÓN DE LA INGENIERÍA GENÉTICA Y LA BIOTECNOLOGÍA

Las tendencias de evolución de la ingeniería genética humana y la biotecnología son presentadas a partir del *Estudio Delphi sobre Ingeniería genética y Biotecnología 2021* del Centro de Investigaciones Sociológicas (CIS), estableciendo comparaciones, tal como indicamos anteriormente, con los datos obtenidos en el *Quinto Estudio Delphi sobre Ingeniería genética y Biotecnología (2015)*, el *Cuarto Estudio Delphi sobre Ingeniería genética Humana y Biotecnología (2011)*, el *Tercer Estudio Delphi sobre Biogenética y Biotecnología (2005)*, el *Segundo Estudio Delphi sobre Biogenética y Biotecnología de 2002* (Sánchez-Morales, 2002: 211-262) y en el *Primer Estudio Delphi sobre Biogenética de 1996* (Sánchez-Morales, 1997: 89-186), del Grupo de Estudio sobre Tendencias Sociales (GETS).

Nos centraremos en la presentación de tres de sus principales líneas de evolución, particularmente de aquellas con mayores repercusiones sociales: 1) desarrollos y aplicaciones en investigación en inge-

nería genética humana y en biotecnología; 2) diagnósticos y sondeos génicos, y 3) nuevas terapias y terapia génica.

Desarrollos y aplicaciones en investigación en ingeniería genética y en biotecnología

En 2013, siendo presidente de los Estados Unidos Obama, se puso en marcha el *Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies* y en Europa se emprendió el *Human Brain Project* centrados, desde la neurociencia, en el conocimiento del cerebro humano. Esta línea de investigación se incorporó, por primera vez, en la encuesta Delphi de 2015 del GETS. En aquella fecha los expertos mencionaron con una seguridad media (3), al tiempo que lo valoraron de gran importancia (4) la «finalización de los primeros mapas funcionales del cerebro» para 2035. En 2021 coexistían dos puntos de vista: los que atribuían que «ya se podría hacer, al menos parcialmente» y para quienes «la complejidad del cerebro humano no permitirá que los descubrimientos científicos tengan una aplicación clínica inmediata».

CUADRO 1. Aplicaciones de la investigación en ingeniería genética y biotecnología

2035

- Aplicación clínica de los primeros mapas funcionales del cerebro*.
- En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizarán dispositivos nanotecnológicos para diagnosticar y curar enfermedades (microcápsulas que contengan genes, proteínas, etc.)
- En más del 50 % de los centros sanitarios de España, se implantarán habitualmente dispositivos electrónicos y materiales sintéticos dentro del cuerpo humano (ojos biónicos, órganos sintéticos...).
- Más del 50 % de los medicamentos se diseñarán en base a los conocimientos de la genómica.
- Más del 50 % de los tratamientos farmacológicos se prescribirán tras haber realizado un estudio farmacogenético al paciente.
- Existencia de sangre artificial*.

Nota: * Previsión hecha por primera vez por los expertos.

Fuente: CIS (2021). Estudio Delphi sobre Tendencias en Ingeniería Genética Humana y Biotecnología.

Dos de las principales líneas de evolución de la ingeniería genética y la biotecnología que sugirieron los expertos en 2021 son las referidas a que, hacia 2050, con una

logía que sugirieron los expertos en 2021 son las referidas a que, hacia 2050, con una

seguridad media en las previsiones de (3), «en España el 50 % de los medicamentos que se diseñarán lo harán en base a los conocimientos de la genómica» (50 % en la encuesta de 2011 y un 60 % en la de 2005), y a que «en España el 50 % de los tratamientos farmacológicos que se prescribirán se harán tras hacer un estudio farmacogenético al paciente» (30 % en el Delphi de 2011 y 60 % en el de 2005). Las observaciones de los entrevistados sobre los medicamentos diseñados en base a la genómica aludieron a que «se trata de un campo complejo y a que el avance será muy lento». Participando que: «es el avance o la tendencia hacia la medicina individual o personalizada».

En los estudios Delphi del GETS de 2005, 2011 y 2015, así como en el de 2021 del CIS, se recogió que aparecerán medicamentos basados en la genómica, y medicamentos a la «carta» tras estudios farmacogenéticos² de los pacientes, dotándolos, en ambos casos, de bastante importancia social. Si, con una seguridad media (3), se planteó en 2015 que en 2035 el 35 % los medicamentos serían de este cariz, en 2021 se mostraron más optimistas al trazar que en el 2035 más del 50 % serán fruto de los conocimientos en genómica. Se produjo un efecto de contracción temporal, habida cuenta de que en 2011 y 2015 se esbozó el horizonte de 2050. Justipreciaron que conllevará «[...] una revolución en este importante campo de investigación clínica», cuya potenciación dependerá de decisiones políticas. Nos sitúa, consecuentemente, ante medicamentos diferentes, que llevarían a curaciones definitivas, puesto que conocer, en su integridad, el papel de los genes en la expresión de lo patológico supondrá un antes y un después en la historia de la farmacología.

² La farmacogenética «[...] pretende utilizar la variación en las secuencias de genes y sus efectos en la variabilidad a las respuestas frente a los medicamentos...» (Muñoz, 2001: 43).

Incluimos en 2021 el acontecimiento de que: «En más del 50% de los centros sanitarios de España se implantarán habitualmente dispositivos electrónicos y materiales sintéticos dentro del cuerpo humano (ojos biónicos, órganos sintéticos...)». Con una seguridad media en la previsión (3) y evaluando de alta la importancia social de sus repercusiones (4), preciaron que será una realidad en 2035 (coincidiendo con los resultados del GETS de 2015). Prefiguraron que «[...] la generación de dispositivos electrónicos bio-integrados mejorará rápidamente y su posible implantación en el cuerpo humano está cada vez más cerca».

Los conocimientos sobre el cerebro humano, el cáncer/es, la biotecnología aplicada a la fabricación de medicamentos, la genómica, la nanotecnología y la farmacogenética nos conducen a un escenario prometedor en el campo de la salud. Los «medicamentos a la carta», y el «ser humano nanotecnológico (*cyborg*)» han de contemplarse desde diversos puntos de vista: 1) apreciando sus beneficios sobre la salud y la calidad de vida humana; 2) atendiendo a las desigualdades en lo que su acceso se refiere, y 3) valorando los riesgos coligados.

Diagnósticos y sondeos génicos

Los diagnósticos/sondeos genéticos, en sus variantes, son piezas clave en la nueva medicina preventiva y curativa que se bosqueja en el siglo XXI. En 2002 los participantes en el Delphi del GETS dispusieron más allá de 2050 que «la mayor parte de las entidades bancarias, compañías de seguros y de salud concederán sus servicios tras sondeos genéticos de sus clientes». Esta tendencia se adelantó en los Delphi de 2005 a 2025, coincidiendo con la estimación de 2011. En 2015 se conjeturó 2030, con una alta seguridad en el diagnóstico (4), al tiempo que participaban de la percep-

ción de que tendría una importancia social del más alto grado (5)³. En 2021 valoraron, añadiéndose a la formulación original: «[...] para detectar, por ejemplo, enfermedades como el coronavirus», a la par que «[...] sería necesario un cambio en cuestiones relativas a la ética social, debiendo haber normas que lo permitieran». Según decían: «alcanzar dicha situación generaría una sociedad de castas, con lo que legalmente supondría instaurar la desigualdad..., [...] resultando espeluznante».

Se propuso a los encuestados que emitieran sus opiniones sobre en qué horizonte temporal: «En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizarán análisis epigenéticos para detectar o combatir enfermedades inducidas por la contaminación ambiental». En 2021 tuvieron claro que sería en 2035, con una seguridad de su previsión e importancia social media (3). Existían dos posiciones: los que apuntaban que «no está demostrado que tengan un interés médico» y para quienes «el conocimiento sobre las modificaciones epigenéticas avanzará en los próximos años gracias a técnicas de secuenciación cada vez más potentes y asequibles».

A mediados de los noventa del siglo pasado científicos británicos (Loveridge *et al.*, 1996) previeron que, entre 2000 y 2004 un 10 % de los diagnósticos laborales serían genéticos. En el Delphi de 2011 del GETS, coincidentes con las previsiones emitidas en 2002 y 2005, manifestaron que no parecía fueran a extenderse los análisis genéticos a los trabajadores, con el fin de detectar predisposiciones a padecer enfermedades genéticas a consecuencia del desempeño de su trabajo en el medio laboral. Aventajaron que en 2050 el 20 % de las empresas los ejecutarían. En 2015 opina-

ron que en 2035 el 5 % y que en 2050 representarían el 13 %. En 2021 este tema se formuló así: «¿En qué horizonte temporal en España más del 50 % de las empresas realizarán a sus trabajadores análisis periódicos epigenéticos⁴, con el fin de detectar predisposiciones a padecer enfermedades genéticas a consecuencia del desempeño de su trabajo?». Refirieron que será un hecho en 2035, con una seguridad e importancia social media (3). Enjuiciaron, además, que fueran epigenéticos es discutible y que: «[...] las implicaciones legales y éticas demandan que no se haga... (si bien) [...] en caso de establecerse abre una puerta a una situación de indefensión de la población ante las empresas» (véase cuadro 2).

Si hay un común denominador en los Delphi internacionales de las últimas décadas es que la genética clínica adquirirá un papel de altura. Según apuntaron los consultados en 2021, con una seguridad media (3), en España en 2035 «[...] más del 50 % de los centros de primera asistencia dispondrán de consultas de medicina genética» (en 2015 estimaron el 15 %). Se adelanta, por tanto, en el tiempo, despuntando lo que «significará la normalización de estos tratamientos, sobre todo para la Medicina Personalizada de Precisión (MPP)» (véase cuadro 2).

Visionarios en este contexto como Karl Kötschau ya en un libro de 1935 titulado *Der Aufbau einer biologischen Medizin (La edificación/construcción de una medicina biológica)* (Kötschau, 1935), con cierto descreimiento, insertó una lámina sobre el médico del mañana, en donde se veía a un clínico sentado, ante lo que sería hoy en día un ordenador interactuando con un paciente.

³ Internacionalmente hay tres posiciones legislativas: 1.º Autorización sin restricciones; 2.º Utilización limitada en casos de que el cliente quiera contratar una póliza muy elevada; y 3.º Prohibición.

⁴ Por epigenética se entiende el estudio de las mutaciones en la función de los genes que son hereditarias y no fruto de alteraciones de la secuencia de ADN.

CUADRO 2. Previsiones sobre diagnósticos genéticos

2030	2035
<ul style="list-style-type: none"> — En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizarán habitualmente marcadores moleculares y genéticos para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades monogenéticas. — En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizarán habitualmente marcadores moleculares y genéticos para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades poligenéticas. — En la mayor parte de los centros sanitarios de España se realizarán habitualmente, diagnósticos genéticos preimplantacionales para seleccionar embriones con fines terapéuticos. 	<ul style="list-style-type: none"> — La mayor parte de las entidades bancarias, compañías de seguros y de salud en España solo concederán sus préstamos, pólizas y seguros médicos tras análisis genéticos de sus clientes para detectar, por ejemplo, enfermedades como el coronavirus. — En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizarán análisis epigenéticos para detectar o combatir enfermedades inducidas por la contaminación ambiental*. — Más del 50 % de las empresas realizarán a sus trabajadores análisis periódicos epigenéticos, con el fin de detectar predisposiciones a padecer enfermedades genéticas a consecuencia del desempleo de su trabajo*. — Más del 50 % de los centros de primera asistencia dispondrán de consultas de medicina genética.

Nota: * Previsión hecha por primera vez por los expertos.

Fuente: CIS (2021). Estudio Delphi sobre tendencias en Ingeniería Genética Humana y Biotecnología.

Las nuevas terapias y terapia génica

Una de las más controvertidas posibilidades en ingeniería genética humana es la que se refiere a los usos de células madre embrionarias⁵ y la clonación terapéutica⁶. Debe diferenciarse entre la utilización de células troncales de tejidos u órganos de adultos o células de embriones humanos. A la luz de las predicciones de 2021, con una seguridad media en el pronóstico (3), los encuestados anticiparon descubrimientos con células madre embrionarias. En concreto, previeron que en 2035 «en la mayor parte de los hospitales en España, se utilizarán habitualmente células madre embrionarias para la regeneración de órganos como el riñón, el hígado...» (coincidiendo con las predicciones de 2015). Según puntualizaban «[...] los tratamientos basados en células embrionarias dependen más de las consideraciones éticas... que de las dificultades tecnológicas que implican», dependiendo, en todo caso, de decisiones políticas (véase cuadro 3).

tades tecnológicas que implican», dependiendo, en todo caso, de decisiones políticas (véase cuadro 3).

Una aplicación específica sobre la que solicitamos su opinión fue sobre si «en la mayor parte de los hospitales de España se utilizarán habitualmente células madre de la zona del “limbo corneal” para curar la ceguera». La distinguieron, con una seguridad media (3), dotándola de importancia media en lo que a sus repercusiones sociales se refiere (3). Apreciaron que «es un tema muy de actualidad, que se está complementando con la reprogramación celular de otros tipos de ceguera» y que «[...] los prejuicios morales dificultarán las aplicaciones médicas de las células madre» (véase cuadro 3).

En 2035 (asimismo, en 2015), con una seguridad elevada (4), al tiempo que recalcaron que tendría una gran importancia social (4): «En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizará habitualmente la terapia génica para la curación de enfermedades de base genética y no solo para casos aislados». Su ejecución dependerá, según expusieron, de variables económicas, técnicas, legislativas y de orden moral (véase cuadro 3).

⁵ Cuestión ligada a la discusión sobre el estatuto ético del embrión humano.

⁶ La clonación no reproductiva se refiere a «la aplicación de técnicas de clonación [...] con objeto de establecer cultivos de tejidos —y si fuera posible, de órganos—...» (Comisión Nacional de Reproducción Humana Asistida, 1998: 65).

CUADRO 3. Previsiones sobre nuevas terapias y la terapia génica

2030	2035	2038	2050
<ul style="list-style-type: none"> – En España en más del 50 % de los tratamientos de cáncer se utilizarán anticuerpos (2050 en 2015). 	<ul style="list-style-type: none"> – En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizarán habitualmente células madre embrionarias para la regeneración de órganos como el riñón, el hígado... – En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizarán habitualmente células inducidas (IPS) para el tratamiento de enfermedades como el párkinson, de riñón, de hígado, etc. – En la mayor parte de los hospitales de España se utilizarán habitualmente células madre de la zona del «limbo corneal» para curar la ceguera. – La mayor parte de los centros sanitarios de España realizará habitualmente la terapia génica para la curación de enfermedades de base genética y no solo para casos aislados. – La edad media de vida alcanzará los cien años como consecuencia, entre otros factores, de los avances en genética humana. – En más del 50 % de las enfermedades se utilizarán para su tratamiento los perfiles proteómicos de los pacientes. – En más del 50 % de las enfermedades se utilizarán para su tratamiento los perfiles de microbiota de los pacientes. – En España existirán dianas terapéuticas para más del 50 % de los tumores (2050, el 30 % en 2015). – En España los hospitales trasplantarán habitualmente corazones de personas fallecidas, que serán reconstruidos utilizando células troncales de pacientes vivos*. – En España se curarán enfermedades neurodegenerativas como el párkinson (utilizando células troncales u otros procedimientos)*. – En España se curarán enfermedades neurodegenerativas como el alzheimer (utilizando células troncales u otros procedimientos)*. 	<ul style="list-style-type: none"> – En España los hospitales implanarán habitualmente órganos artificiales (corazones, riñones, hígados, etc.) realizados con polímero y material biológico humano*. 	<ul style="list-style-type: none"> – En más del 50 % de las enfermedades se utilizarán para su tratamiento los perfiles proteómicos de los pacientes. – En más del 50 % de las enfermedades se utilizarán para su tratamiento los perfiles de microbiota de los pacientes*.

Nota: * Previsión hecha por primera vez por los expertos.

Fuente: CIS (2021). Estudio Delphi sobre tendencias en Ingeniería Genética Humana y Biotecnología.

Tras la finalización del Proyecto Genoma Humano en abril de 2003 se abrió una importante línea explorativa en biomedicina. Por un lado, la proteómica, objetivada en la identificación de las proteínas y su funcionamiento y, por otro, la genómica, orientada al estudio de las funciones, interacciones y expresión de los genes. Según los consultados, en 2035, con una seguridad

media en el pronóstico (3) y arbitrando de «bastante importantes» (4) las repercusiones sociales que pudieran derivarse, «en más del 50 % de las enfermedades se utilizarán para su tratamiento los perfiles proteómicos de los pacientes» (en 2050, en 2015). Según nos relataron «es un abordaje muy importante [...] una esperanza», que exigirá de «[...] un abaratamiento del proceso y una

estandarización del análisis» (véase cuadro 3).

Las mejoras en biología molecular han ahondado en los mecanismos generadores del cáncer, su progresión, invasión y metástasizarian, hasta el punto de haber sido descubiertas numerosas alteraciones moleculares de las células neoplásicas. Dos vías para el tratamiento del cáncer que han demostrado eficacia son la utilización de dianas terapéuticas y de anticuerpos monoclonales. Los expertos en 2021 previeron que en 2035 «en España existirán dianas terapéuticas para más del 50 % de los tumores» (con una seguridad media e importancia social media de 3) (el 29 % para 2035 en la encuesta de 2015). Se observa una subida del nivel de confianza respecto a las contingencias de la genómica. En 2021 hubo razonamientos contrapuestos: mientras un sector estipuló que «el avance en el conocimiento médico permitirá en breve que la gran mayoría de los tumores dispongan de tratamientos específicos», otros relataron que «[...] aunque se está investigando mucho sobre este tipo de enfermedades, parece que irá lento» (véase cuadro 3).

Por otro lado, la utilización de anticuerpos (inmunoterapia)⁷ en el tratamiento/curación del cáncer es otra alternativa curativa con gran porvenir. Anticiparon que en 2030 «[...] en España en más del 50 % de los tratamientos del cáncer se utilizarán anticuerpos» (el 20 % en la encuesta de 2015), delatándose consideraciones dispares. Si para algunos «la inmunoterapia avanza a paso de gigante y en un plazo temporal medio se dispondrá de anticuerpos frente a una gran parte de los tumores» para otros: «[...] habrá que buscar alternativas paralelas» (véase cuadro 3).

⁷ «Los anticuerpos monoclonales se utilizan para tratar muchas enfermedades, incluido... (diversos)... tipos de cáncer...». Disponible en: <https://www.cancer.org/es/tratamiento/tratamientos-y-efectos-secundarios/tipos-de-tratamiento/inmunoterapia/anticuerpos-monoclonales.html>, acceso 5 de mayo de 2023.

Igualmente, en 2035 trazaron que: «en España los hospitales trasplantarán habitualmente corazones de personas fallecidas, que serán reconstruidos utilizando células troncales de pacientes vivos», que «en España se curarán enfermedades neurodegenerativas como el párkinson (utilizando células troncales u otras técnicas)» y que: «En España se curarán enfermedades neurodegenerativas como el alzheimer (utilizando células troncales u otros procedimientos)». En los tres casos la seguridad fue media (3), enjuiciando de bastante importancia (4) el abordaje terapéutico del párkinson y del alzheimer. Sobre la primera cuestión expusieron que «a la dependencia de recursos y políticas se unen aquí las necesarias dimensiones éticas y dependerá de si aparecen otras alternativas más viables o eficientes». Respecto a la curación del alzheimer distinguieron que «[...] es más complicado que el párkinson» por tratarse, «[...] quizá de una enfermedad muy plurifactorial» (véase cuadro 3).

Un tema colateral se conecta con que, conjeturalmente, en 2038 «los hospitales implantarán habitualmente órganos artificiales (corazones, riñones, hígados...) realizados con polímero y material biológico humano». La seguridad en el diagnóstico de los encuestados fue de 3, precisando, globalmente, que tendrá bastante importancia social (4). Determinaron que «la producción de órganos artificiales depende más de las consideraciones éticas de una parte de la población con respecto a la investigación con células madre que de las dificultades tecnológicas».

Derivado de lo anterior cobra especial significación, a medio plazo (2035), que «la edad media de vida alcance los ciento veinte años o más como consecuencia, entre otros factores, del avance de la biogenética» (coincidiendo con la predicción del estudio de 2015 para los 100 años). Mayoritariamente expusieron una argumentación que reproducimos por su interés socioló-

gico: «[...] aumentarán, seguro, las expectativas de vida y [...] será necesario revertir o impedir el envejecimiento celular de todo el cuerpo, en particular, del cerebro». Si bien, no creen que la edad tope de los 120 se lleve a superar. Sería «[...] sobre todo como efecto de una medicina integradora y pluridisciplinar y de políticas sociales adecuadas».

Nos enfrentamos, por tanto, a un modelo de medicina regenerativa, con especial notabilidad de las terapias celulares. Más la medicina regenerativa precisa de la interconexión de variadas disciplinas: la biología celular, la inmunología, la investigación clínica, la *transplantología*, la ingeniería de tejidos y las terapias celulares. Facultará, previsiblemente, en la curación de patologías como el cáncer, la ceguera, en materia de trasplantes... y conllevará una elevación de la edad media de vida en el siglo XXI.

REFLEXIONES FINALES

La ciencia y la tecnología son dinamizadoras clave del cambio social, trascienden su propio marco y son esenciales en la mayoría de las actividades cotidianas de la vida de los seres humanos. Particularmente, las repercusiones sociales de la ingeniería genética y la biotecnología han hecho necesario que las investigaciones que se acometan a la hora de estudiar sus implicaciones sean interdisciplinarias. Sus avances se suceden ininterrumpidamente, aunque no involucren a todos los ciudadanos del planeta. La experiencia vivida con la pandemia de la COVID-19 y la aparición de diversas vacunas, algunas novedosas en vacunología, son una muestra de los tiempos con los que nos manejamos en este terreno.

La presentación de su futuro requiere prudencia, por lo que juzgamos imprescindible contrastar las opiniones de los expertos. La prospectiva es en sí misma tarea compleja, por la propia naturaleza de las

investigaciones y por el hecho de encadenar discusiones que involucran a otras esferas del conocimiento y del saber. Nos encontramos en ciernes de la quinta revolución industrial, cuya protagonista será la inteligencia artificial que, en conexión con la nanotecnología, la ingeniería genética y la biotecnología llevará a la fusión humano-máquina, presentada como una oportunidad para «crear» un nuevo ser humano con mayores capacidades y habilidades.

De ahí la importancia de efectuar estudios prospectivos como el que aquí hemos presentado en sus principales resultados. Trascendimos los datos meramente científicos, puesta la mirada en anticipar a la propia comunidad científica, a los investigadores sociales y a la opinión pública las repercusiones de estos avances sobre las sociedades y los seres humanos a futuro.

BIBLIOGRAFÍA

- CIS (2021). *Estudio Delphi 2021 sobre Tendencias Sociales, Políticas y Económicas, Tendencias Científico-Tecnológicas y Tendencias en Salud Mental*. Estudio n.º 11002. Madrid: Centro de Investigaciones Sociológicas. Disponible en: https://www.cis.es/cis/opencm/ES/1_encuestas/estudios/ver.jsp?estudio=14607, acceso 22 de abril de 2023.
- Comisión Nacional de Reproducción Humana Asistida (1998). *I Informe Anual*. Diciembre.
- Feito-Grande, Lydia (2010). Investigación con células troncales y tecnologías de mejora humana: tendencias en el debate ético y social. En: M. Moreno Muñoz (coord.). *Perspectivas en la investigación con células troncales. Aspectos científicos, éticos, sociales y legales*. Granada: Editorial Comares.
- Grupo de Estudio sobre Tendencias Sociales. Disponible en: <https://grupogets.wordpress.com>, acceso 10 de abril de 2023.
- Kötschau, Karl (1935). *Zum Aufbau einer biologischen Medizin*. Stuttgart: Hippokrates-Verlag.
- Loveridge, Denis; Georghiou, Luke y Neveda, María (1996). *United Kingdom Technology Foresight Programme Delphi Survey*. Manchester: The University of Manchester.

- Muñoz, Miguel (coord.) (2010). *Perspectivas en la investigación con células troncales. Aspectos científicos, éticos, sociales y legales*. Granada: Editorial Comares.
- Pierna, María; Marcos-Vadillo, Elena; García-Berrocal, Belén e Isidoro-García, María (2019). «Farmacogenómica: la medicina personalizada». *Revista del Laboratorio Clínico*, 12(3).
- Prior-González, Oscar A.; Garza-González, Elvira; Fuentes de la Fuente, Hugo A.; Rodríguez-Leal, Celina; Maldonado-Garza, Héctor J. y Bosques-Padilla, Francisco J. (2022). «Farmacogenética y su importancia clínica: hacia una terapia personalizada segura y eficiente». *Medicina Universitaria*, 13(50).
- Sánchez-Morales, M.^a Rosario (1997). Aproximación prospectiva a la Biogenética. En: J. F. Tezanos; J. A. Díaz-Martínez; M. R. Sánchez-Morales y A. López (eds.). *Estudio Delphi sobre tendencias científico-tecnológicas en España*. Madrid: Editorial Sistema.
- Sánchez-Morales, M.^a Rosario (2002). Biogenética y Biotecnología: Tendencias de evolución en el siglo XXI. En: J. F. Tezanos; J. Bordas; A. López y M. R. Sánchez-Morales (eds.). *Estudio Delphi sobre tendencias científico tecnológicas*. Madrid: Editorial Sistema.

RECEPCIÓN: 17/05/2023

REVISIÓN: 28/09/2023

APROBACIÓN: 15/11/2023

Future Trends in Genetic Engineering and Biotechnology

Tendencias de futuro de la ingeniería genética y la biotecnología

María Rosario H. Sánchez Morales

Key words

Biotechnology
• Social Effects
• Human Genetic Engineering

Palabras clave

Biología
• Efectos sociales
• Ingeniería genética humana

Abstract

Developments in Human Genetic Engineering and Biotechnology have had and continue to have a strong impact on society. This is due to the fact that their working tools include gametes, embryos, germ cells and genes, which may have both beneficial and inappropriate uses. These uses have significant consequences for the human species, for social organisation and for the very model of society. This text presents the main results of research undertaken by the Centre for Sociological Research (Centro de Investigaciones Sociológicas) in 2021 whereby a Delphi survey was administered to 25 experts in the field who identified the main areas of development, which have notable social repercussions.

Resumen

Los desarrollos en ingeniería genética humana y biotecnología han tenido y tienen evidentes alcances para la sociedad. Hecho que se explica porque sus herramientas de trabajo son gametos, embriones, células germinales, genes, etc., y, junto a usos benefactores, pueden coexistir usos inapropiados. Las secuelas para la especie humana, la organización social y para el propio modelo de sociedad son importantes. En este texto se presentan los principales resultados de una investigación acometida por el Centro de Investigaciones Sociológicas en el año 2021 en el que, a través de una encuesta Delphi, se consultó a 25 expertos en la materia, quienes nos proyectaron sus principales líneas de evolución que, como veremos, tienen notables repercusiones sociales.

Citation

Sánchez Morales, María Rosario H. (2024). "Future Trends in Genetic Engineering and Biotechnology". *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, 187: 147-158. (doi: 10.5477/cis/reis.187.147-158)

María Rosario H. Sánchez Morales: UNED-CIS | msanchez@poli.uned.es



INTRODUCTION

The aim of Human Genetic Engineering is to modify the genetic information (DNA) contained in cells by generating recombinant DNA molecules. In the field of health, Non-Human Genetic Engineering (Biotechnology) engages in the manufacture of pharmaceutical products, vaccines (several of the vaccines against COVID-19 were generated in this way) and antibiotics. Pharmacogenetics (Prior-González *et al.*, 2011: 41-49) and pharmacogenomics (Pierna-Alvárez *et al.*, 2019: 147-154), which seek to identify the drugs that best fit the genetic profiles of patients, stand out in terms of new developments.

Biotechnology has been defined by the European Federation of Biotechnology as:

[...] the integrated use of biochemistry, microbiology and genetic engineering to apply the capabilities of micro-organisms, cultured animal or plant cells or parts thereof in industry, health or environment-related processes. This was the solution used to mitigate SARS-CoV-2.

Let us start with Human Genetic Engineering. Its applicability has caused significant ethical dilemmas, as it allows room for interventions in human beings, both for therapeutic purposes (genetic diagnostics, cell therapies...) and for a potential enhancement of the race (transhumanism)¹ (Feito-Grande, 2010: 73-91). This is a model of predictive, regenerative and individualised medicine, within a context of technological convergence, which plays a fundamental role in Information and Communication Technology. Genetic diagnostics (pre-implantation, prenatal, postnatal), cell therapies (with possibly the most promising being gene therapy), the use of stem cells (cell therapy) and, eventually, thera-

peutic cloning, are particularly noteworthy. This must be contextualised within a public health ethic.

In 2021, the Centre for Sociological Research (CIS) carried out a *Delphi Study on Trends in Genetic Engineering and Biotechnology* (CIS, 2021) in order to study these developments and identify their potential opportunities in the future. The methodology used, followed by the main results, will be presented here. These will also be compared with previous studies by the *Grupo de Estudio sobre Tendencias Sociales* (Study Group on Social Trends) (GETS). The rationale for this decision is that these are the only studies available for Spain. This approach will make it possible to follow up and observe the evolutionary trends over three decades.

METHODOLOGY

As detailed in the CIS survey fact sheet:

The Delphi methodology has been used in this case to determine the probability of occurrence of certain events and changes, and to assess their importance in a time horizon estimated in a decade for the major trends, and in more precise time frames for each of the specific innovations considered (horizons 2025, 2030, 2035, 2050) (CIS, 2021).

This methodology was deemed to be the most appropriate for the purpose of the study. As there are highly qualified experts in this field in Spain, a *Delphi Survey on trends in Genetic Engineering and Biotechnology* was carried out. The methodological steps followed were: 1. Discussion of the questionnaire by the research team. 2. Obtaining counter-evidence. 3. Referral to the expert group. Those selected included university professors, scientists, doctors and top-level researchers who were highly specialised in the field.

¹ The ideology of transhumanism proposes building a healthier, more intelligent human being, who is freed from all pathologies, including death.

The survey was developed largely on the basis of information obtained from previous studies conducted by the GETS. Once it had been outlined, several pilot interviews were carried out in order to confirm the appropriateness of the questions and the various issues raised (between 20 and 28 February 2021). It consisted of different types of questions. Some asked respondents to provide a forecast or trend for the topic under consideration; in this process, the updated data on what was consulted on the date of the first circulation of the questionnaires was inserted next to the question as guidance for the experts, where appropriate. In two sections of the questionnaire the

respondents were asked to rate their confidence in their answers on a scale from 1 (not confident at all) to 5 (very confident), as well as their estimated importance of the social effects of the events, rated on the same scale. they were invited to make observations and comments on each of them.

There were other questions dealing with general issues, which were addressed using pre-coded open questions that encouraged responses in the second circulation of the surveys. The estimated completion time, given its complexity, was estimated to be around 40 minutes. The first one was sent between 15 and 18 March 2021 to 138 experts, and 25 responses were received.

TABLE 1. *Level of survey coverage*

Total number of theoretical surveys (first round)	Total number of responses (first round)	% of responses	Number of responses (second round)	% of responses
138	25	18.1	25	100

Source: CIS (2021). Delphi Study on Trends in Human Genetic Engineering and Biotechnology.

These were analysed by establishing the median and the first and third quartiles, as well as asking them about their confidence in predicting their responses and the importance and impact of the events. The information from the first round was used to compile the survey for the second round, including expert responses, together with general comments on each of the forecasts. Their initial estimates were also collected and they were asked to confirm or modify them, depending on the answers of the other participants.

The second questionnaire was sent to them between 8 and 21 June, enclosing the personal responses from the first round and a list of the main observations made by the rest of the group. Twenty-five experts responded in the second round, and the collection of responses ended on 14 July. Data (medians,

first and third quartiles of responses) were collected between 15 and 30 July.

Between the first and second round of questionnaires, changes and nuances in forecasts and time horizons were noted in relation to the initial assessments made by the experts. The rigorous procedures employed in this research guarantee its reliability, and made it possible to identify trends and make forecast about their impact on societies and individuals in the short, medium and long term.

FUTURE TRENDS IN THE EVOLUTION OF GENETIC ENGINEERING AND BIOTECHNOLOGY

The future trends in the development of Human Genetic Engineering and Biotechnology,

as established by the *Delphi Study on Genetic Engineering and Biotechnology 2021* by the *Centro de Investigaciones Sociológicas* (CIS), are presented here. The study has made comparisons with the data obtained in the *Fifth Delphi Study on Genetic Engineering and Biotechnology* (2015), the *Fourth Delphi Study on Human Genetic Engineering and Biotechnology* (2011), the *Third Delphi Study on Biogenetics and Biotechnology* (2005), the *Second Delphi Study on Biogenetics and Biotechnology* (2002) (Sánchez-Morales, 2002: 211-262), and in *First Delphi Study on Biogenetics* (1996) (Sánchez-Morales, 1997: 89-186), of the *Grupo de Estudio sobre Tendencias Sociales* (GETS).

Three of its main avenues of development, particularly those with the greatest social repercussions, will now be discussed: 1. Developments and applications in Human Genetic Engineering and Biotechnology research; 2. Gene-based diagnostics and probes; and 3. New therapies and gene therapy.

Developments and applications in Genetic Engineering and Biotechnology research

In 2013, when Barak Obama was President of the United States, the *Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies* was launched; meanwhile, the *Human Brain Project* was launched in Europe, which focused on neuroscience, on understanding the human brain. This avenue of research was first incorporated into the 2015 GETS Delphi survey. At the time, the participating experts stated that they were fairly confident about (3), and considered of great importance (4), the “completion of the first functional maps of the brain” by 2035. In 2021, two views coexisted: those who argued that “it could already be done, at least partially” and those who believed that “the complexity of the human brain will not allow scientific discoveries to have an immediate clinical application”.

BOX 1. Applications of Genetic Engineering and Biotechnology research

2035

- Clinical application of the first functional brain maps*.
- In most health centres in Spain, nanotechnology devices will be used to diagnose and cure diseases (microcapsules containing genes, proteins, etc.).
- In more than 50 % of health centres in Spain, electronic devices and synthetic materials will be routinely implanted inside the human body (bionic eyes, synthetic organs...).
- More than 50 % of medicines will be designed on the basis of genomics knowledge.
- More than 50 % of pharmacological treatments will be prescribed after a pharmacogenetic study has been carried out on the patient.
- Existence of artificial blood*.

Note: * First-time expert forecast.

Source: CIS (2021). Delphi Study on Trends in Human Genetic Engineering and Biotechnology.

Two of the main areas of development of Genetic Engineering and Biotechnology suggested by the experts in 2021, about which they were fairly confident (3) in their forecasts, referred to the fact that by 2050, “50 % of the medicines that will be designed in Spain will be based on genomic

knowledge” (50 % in the 2011 survey and 60 % in the 2005 survey); and that “in Spain, 50 % of the pharmacological treatments will be prescribed after conducting a pharmacogenetic study of the patient” (30 % in the 2011 Delphi and 60 % in the 2005 Delphi). Respondents’ comments on

genomics-engineered medicines were that “it is a complex field and progress will be very slow”. Their forecast was: “it is the advance or trend towards individual or personalised medicine”.

The GETS Delphi studies from 2005, 2011 and 2015, as well as the 2021 CIS Delphi study, indicated that genomics-based medicines and “on-demand” medicines will emerge following² pharmacogenetic studies of patients, both of which were rated as being considerable social importance. While the experts surveyed were fairly confident (3) in 2015 that 35 % of medicines would be of this nature by 2035, in 2021 they were more optimistic, as they predicted that by 2035 more than 50 % will be the result of genomics knowledge. There was a time contraction effect, given that the 2050 horizon was outlined both in 2011 and 2015. The participants argued that it will bring “[...] a revolution in this important field of clinical research”, the development of which will depend on political decisions. Consequently, we are faced with different drugs which would lead to definitive cures, since having full knowledge about the role of genes in the expression of pathology will mark a turning point in the history of pharmacology.

In 2021 the following was included: “In more than 50 % of health centres in Spain, electronic devices and synthetic materials (bionic eyes, synthetic organs...) will be routinely implanted inside the human body”. The experts were fairly confident about the forecast (3), considered that the social repercussions of this development will be quite important (4), and predicted that this will be a reality by 2035 (in line with the results of the 2015 GETS survey). They anticipated that “[...] the generation of bio-integrated electronic devices will improve

rapidly and their possible implantation in the human body is getting closer and closer”.

Knowledge about the human brain, cancer/s, Biotechnology applied to the manufacture of medicines, genomics, nanotechnology and pharmacogenetics are leading to a promising scenario in the field of health. Drugs produced “a la carte” and the “nanotechnological human being (*Cyborg*)” should be assessed from different points of view: firstly, appreciating their benefits for health and the quality of human life; second, by addressing inequalities in terms of access; and third, by assessing related risks.

Gene-based diagnostics and probes

Gene-based diagnostics/probes and their variants are key parts in the new preventive and curative medicine that is emerging in the 21st century. In 2002, the GETS Delphi participants predicted that beyond 2050, “most banks, insurance companies and health care companies would require their prospective clients to undertake genetic screening”. This trend was brought forward in the 2005 Delphi to 2025, in line with the 2011 estimate. In 2015, the tentative date was 2030, with high diagnostic confidence (4), while sharing in the perception that this would have the highest level of social importance (5)³. In 2021 they added the following to the original formulation: “[...] to detect, for example, diseases such as coronavirus”, while “[...] a change in social ethics issues would be necessary, and there should be rules to allow this”. They said: “if this situation came to fruition, it would create a caste society, with the legal implications of establishing inequality..., [...] which would be horrifying”.

² Pharmacogenetics “[...] aims to use variation in gene sequences and their effects on variability in responses to drugs...” (Muñoz, 2001: 43).

³ There are three legislative positions worldwide: 1. Unrestricted authorisation; 2. Limited use in cases where the client wants to take out a very high insurance policy; and 3. Prohibition.

BOX 2. *Forecasts on genetic diagnostics*

2030	2035
<ul style="list-style-type: none"> – Molecular and genetic markers will be routinely used in most health centres in Spain for the diagnosis and treatment of single gene diseases. – Molecular and genetic markers will be routinely used in most health centres in Spain for the diagnosis and treatment of single gene diseases. – In most health centres in Spain, pre-implantation genetic diagnosis will be routinely performed to select embryos for therapeutic purposes. 	<ul style="list-style-type: none"> – Most banks, insurance and health insurance companies in Spain will only grant loans, policies and health insurance after genetic screening of their clients for, for example, diseases such as coronavirus. – Epigenetic testing will be used in most health centres in Spain to detect or combat diseases induced by environmental pollution*. – More than 50 % of companies will carry out regular epigenetic testing of their employees, in order to detect predispositions to genetic diseases resulting from their work duties and environment*. – More than 50 % of the primary care centres will have genetic medicine consults.

Note: * First-time expert forecast.

Source: CIS (2021). Delphi Study on Trends in Human Genetic Engineering and Biotechnology.

Respondents were asked to give their views on the time horizon before the following to be the case that: “In most health centres in Spain, epigenetic analyses will be used to detect or combat diseases induced by environmental pollution”. In 2021 it was clear to them that this would happen by 2035, with experts being fairly confident and considering that it would be fairly important in social terms (3). There were two positions: those who pointed out that “they have not been proven to have medical interest” and those who were of the opinion that “knowledge about epigenetic modifications will advance in the coming years thanks to increasingly powerful and affordable sequencing techniques”.

In the mid-1990s, British scientists (Loveridge, Georghiou and Neveda, 1996) predicted that between 2000 and 2004, genetics would be used in 10 % of occupational diagnoses. In the 2011 GETS Delphi, in line with the forecasts issued in 2002 and 2005, the experts stated that genetic testing of workers for predisposition to genetic diseases resulting from their work duties and environment did not appear to be widespread. They predicted that 20 % of companies would implement this by 2050. In 2015

they anticipated that in 2035 it would be 5 % and in 2050 it would be 13 %. In 2021 this issue was formulated as follows: “What is the time horizon for more than 50 % of companies in Spain to carry out regular⁴ epigenetic tests on their workers in order to detect predispositions to suffer from genetic diseases as a result of their work?” They said it will be a fact of life by 2035, and were fairly confident about this and considered that it would be fairly important for society(3). They also argued that epigenetic testing is debatable and that: “[...] the legal and ethical implications demand that it should not be done... (although) [...] if it is established, it opens the door to a situation of defencelessness of the population against companies” (see Box 2).

If there was one common denominator in the international Delphi of the last decades, it is that clinical genetics will take on a major role. Those consulted in 2021 were fairly confident (3) that “[...] more than 50 % of primary care centres will have genetic medicine consultations” in Spain in 2035 (in

⁴ Epigenetics refers to the study of mutations in gene function that are heritable and do not result from alterations in the DNA sequence.

2015 they estimated 15 %). It was therefore ahead of its time, and it would be particularly significant what “the widespread use of these treatments will mean, especially for Personalised Precision Medicine (PPM)” (see Box 2).

Karl Kötschau was a visionary in this area, as, in 1935 he wrote a book entitled *Der Aufbau einer biologischen Medizin (The building/construction of a biological medicine)* (Kötschau, 1935) in which, with some disbelief, included a picture of the doctor of the future, showing a clinician sitting in front of what would be today a computer interacting with a patient.

New therapies and gene-based therapy

One of the most controversial aspects of Human Genetic Engineering concerns the uses of embryonic stem cells⁵ and therapeutic cloning⁶. A distinction must be made between the use of stem cells from adult tissues or organs and of cells from human embryos. In light of the 2021 predictions, respondents were fairly confident (3) that there would be breakthroughs related to embryonic stem cells. Specifically, they predicted that by 2035 “in most hospitals in Spain, embryonic stem cells will be routinely used for the regeneration of organs such as the kidney, liver...” (consistently with the 2015 predictions). According to them, “[...] embryonic cell-based treatments depend more on ethical considerations... than on the technological difficulties involved”, and are, in any case, dependent on political decisions (see Box 3).

⁵ Question linked to the discussion on the ethical status of the human embryo.

⁶ Non-reproductive cloning refers to “the application of cloning techniques [...] for the purpose of establishing tissue —and if possible organ— cultures...” (National Commission on Assisted Human Reproduction, 1998: 65).

The experts were also asked for their opinion on one specific application, namely, whether “in most hospitals in Spain, stem cells from the ‘corneal limbus’ area would be routinely used to cure blindness”. They were fairly confident that this would be the case (3) and believed that it would be fairly important in terms of its social impact (3). They were of the view that “it is a very topical issue, which is being complemented by cell reprogramming for other types of blindness” and that “[...] moral prejudices will hinder the medical applications of stem cells” (see Box 3).

In 2035 (2035 also in 2015), the experts surveyed indicated they were highly confident that (4): “In most health centres in Spain, gene-based therapy will be routinely used to cure genetically-based diseases and not just for isolated cases.” while stressing that it would be of great social importance (4). Its implementation would depend, they argued, on economic, technical, legislative and moral variables (see Box 3).

Following the completion of the Human Genome Project in April 2003, an important area of exploration in biomedicine was opened up. On the one hand, proteomics, which focuses on the identification of proteins and how they function; and on the other, genomics, which is concerned with the study of the functions, interactions and expression of genes. According to those consulted, by 2035, with a medium prognostic confidence (3) and “fairly significant” (4) social repercussions, “more than 50 % of diseases will be treated using proteomic profiling of patients” (in 2050 in 2015). They told us that “it is a very important approach... a very hopeful one”, which will require “... cutting the costs involved in the process and developing a standardised analysis” (see Box 3).

Improvements in molecular biology have provided insight into the mechanisms that generate cancer, its progression, invasion

and metastasis, to the extent that numerous molecular alterations of neoplastic cells have been discovered. Two avenues for cancer treatment that have demonstrated efficacy are the use of therapeutic targets and monoclonal antibodies. The experts surveyed in 2021 predicted that by 2035 “There will be therapeutic targets for more than 50 % of tumours in Spain” (with a fair level of confidence and considering this fairly important in social terms (3)) (29 % by 2035 in the 2015 survey). The level of confidence in genomics contingencies was found to be rising. In 2021 there were conflicting rationales: while one sector stipulated that “advances in medical knowledge will soon allow specific treatments to be available for the vast majority of tumours”, others noted that “[...] although a lot of research is being done on this type of disease, progress seems to be slow” (see Box 3).

On the other hand, the use of antibodies (immunotherapy)⁷ in the treatment/cure of cancer is another alternative with a great future. They anticipated that by 2030 “[...] more than 50 % of cancer treatments will use antibodies in Spain” (20 % in the 2015 survey), revealing disparate considerations. While some believed that “immunotherapy is making great strides and antibodies against a large proportion of tumours will be available in the medium term”, others thought that “[...] parallel alternatives will have to be sought” (see Box 3).

Similarly, in 2035 they anticipated that: “In Spain, hospitals will routinely transplant hearts from deceased people, which will be reconstructed using stem cells from living patients”; that “neurodegenerative diseases such as Parkinson’s will be cured in Spain

(using stem cells or other techniques)”; and that, “neurodegenerative diseases such as Alzheimer’s will be cured in Spain (using stem cells or other techniques)”. In all three cases, respondents were fairly confident about their forecast (3), and this therapeutic approach to Parkinson’s and Alzheimer’s was assessed as being quite important (4). On the first issue, they argued that “in addition to resource and policy dependency, there are some necessary ethical dimensions to be considered, and it will depend on whether other more viable or efficient alternatives emerge”. With regard to the cure for Alzheimer’s, they noted that “[...] it is more complicated than Parkinson’s” because it is, “[...] perhaps a very multifactorial disease” (see Box 3).

A collateral issue is connected with the fact that, conjecturally, in 2038 “Hospitals will routinely implant artificial organs (hearts, kidneys, livers...) made of polymer and human biological material”. Respondents’ confidence in the diagnosis was rated as 3, indicating, overall, that it will be of considerable social importance (4). They affirmed that “the production of artificial organs depends more on the ethical considerations of part of the population with regard to stem cell research than on technological difficulties”.

In the medium term (2035), it is particularly significant that “the average lifespan will reach 120 years or more, as a result of advances in biogenetics, among other factors” (consistently with the prediction of the 2015 study for 100 years). Most of them put forward an argument that is reproduced here for its sociological interest: “[...] lifespan will certainly increase and [...] it will be necessary to reverse or prevent cellular ageing throughout the body, particularly in the brain”. However, they did not believe that the age limit of 120 will be exceeded. It would be “[...] above all as an effect of integrative and multidisciplinary medicine and appropriate social policies”.

⁷ “Monoclonal antibodies are used to treat many diseases, including... (various)... types of cancer...”. Available at: <https://www.cancer.org/es/tratamiento/tratamientos-y-efectos-secundarios/tipos-de-tratamiento/inmunoterapia/anticuerpos-monoclonales.html>, access May 5, 2023.

BOX 3. Forecast on new therapies and gene-based therapy

2030	2035	2038	2050
<ul style="list-style-type: none"> – In Spain, more than 50 % of cancer treatments will use antibodies (2050 in 2015). 	<ul style="list-style-type: none"> – In most health centres in Spain, embryonic stem cells will be routinely used for the regeneration of organs such as kidney, liver... – In most health centres in Spain, induced pluripotent stem cells (iPS) will be routinely used for the treatment of diseases such as Parkinson's disease, kidney disease, liver disease, etc. – In most hospitals in Spain, stem cells from the "corneal limbus" area will be routinely used to cure blindness. – Most health centres in Spain will routinely perform gene therapy for the cure of genetically-based diseases and not just for isolated cases. – The average lifespan will reach 100 years as a result of advances in human genetics, among other factors. – The proteomic profiling of patients will be used for the treatment of more than 50 % of diseases. – The microbiota profiles of patients will be used for the treatment of more than 50 % of diseases. – In Spain there will be therapeutic targets for more than 50 % of tumours (2050; 30 % in 2015). – In Spain, hospitals will routinely transplant hearts from deceased persons, which will be reconstructed using stem cells from living patients*. – In Spain, neurodegenerative diseases such as Parkinson's will be cured (using stem cells or other procedures)*. – In Spain, neurodegenerative diseases such as Alzheimer's will be cured (using stem cells or other procedures)*. 	<ul style="list-style-type: none"> – In Spain, hospitals will routinely implant artificial organs (hearts, kidneys, livers, etc.) made of polymer and human biological material*. 	<ul style="list-style-type: none"> – The proteomic profiling of patients will be used for the treatment of more than 50 % of diseases. – The microbiota profiles of patients will be used for the treatment of more than 50 % of diseases.

Note: * First-time expert forecast.

Source: CIS (2021). Delphi Study on Trends in Human Genetic Engineering and Biotechnology.

This is therefore a model of regenerative medicine, with a particular emphasis on cell therapies. Moreover, regenerative medicine requires the interconnection of various disciplines: cell biology, immunology, clinical research, *transplantology*, tissue engineering and cell therapies. It will foreseeably help in curing pathologies such as cancer and blindness, and will also facilitate transplants, etc., which will lead to an increase in the average lifespan in the 21st century.

FINAL REFLECTIONS

Science and technology are key drivers of social change, as they their own scope of practice and are essential to most of people's everyday activities. In particular, the social repercussions of Genetic Engineering and Biotechnology have made it necessary to undertake interdisciplinary research to study their implications. Its progress continues uninterrupted, even though it does

not involve the entire the population on the planet. The experience of the COVID-19 pandemic and the emergence of several vaccines, some of them novel in vaccinology, are a sign of the times in the field.

Making forecasts for the future demands caution, and it is therefore essential to counter differing experts' views. Foresight is in itself a complex task, due to the very nature of research and the fact that it involves discussions with other disciplines and spheres of knowledge. Society is on the verge of the fifth industrial revolution, where artificial intelligence will play the key role and, in connection with nanotechnology, genetic engineering and biotechnology, will lead to human-machine fusion. This emerges as an opportunity to "create" a new human being with greater capacities and abilities.

Hence the importance of prospective studies such as the one presented here. The report of the main results here has gone beyond providing purely scientific data; rather, it aims to inform the scientific community itself, social researchers and public opinion of the anticipated repercussions of these advances on societies and human beings in the future.

BIBLIOGRAPHY

- CIS (2021). *Estudio Delphi 2021 sobre Tendencias Sociales, Políticas y Económicas, Tendencias Científico-Tecnológicas y Tendencias en Salud Mental*. Estudio n.º 11002. Madrid: Centro de Investigaciones Sociológicas. Available at: https://www.cis.es/cis/opencm/ES/1_encuestas/estudios/ver.jsp?estudio=14607, access April 22, 2023.
- Comisión Nacional de Reproducción Humana Asistida (1998). *I Informe Anual*. Diciembre.
- Feito-Grande, Lydia (2010). Investigación con células troncales y tecnologías de mejora humana: tendencias en el debate ético y social. In: M. Moreno Muñoz (coord.). *Perspectivas en la investigación con células troncales. Aspectos científicos, éticos, sociales y legales*. Granada: Editorial Comares.
- Grupo de Estudio sobre Tendencias Sociales. Available at: <https://gruposets.wordpress.com>, access April 10, 2023.
- Kötschau, Karl (1935). *Zum Aufbau einer biologischen Medizin*. Stuttgart: Hippokrates-Verlag.
- Muñoz, Miguel (coord.) (2010). *Perspectivas en la investigación con células troncales. Aspectos científicos, éticos, sociales y legales*. Granada: Editorial Comares.
- Pierna, María; Marcos-Vadillo, Elena; García-Berrocal, Belén and Isidoro-García, María (2019). "Farmacogenómica: la medicina personalizada". *Revista del Laboratorio Clínico*, 12(3).
- Prior-González, Oscar A.; Garza-González, Elvira; Fuentes de la Fuente, Hugo A.; Rodríguez-Leal, Celina; Maldonado-Garza, Héctor J. and Bosques-Padilla, Francisco J. (2022). "Farmacogenética y su importancia clínica: hacia una terapia personalizada segura y eficiente". *Medicina Universitaria*, 13(50).
- Sánchez-Morales, M.^a Rosario (1997). Aproximación prospectiva a la Biogenética. In: J. F. Tezanos; J. A. Díaz-Martínez; M. R. Sánchez-Morales and A. López (eds.). *Estudio Delphi sobre tendencias científico-tecnológicas en España*. Madrid: Editorial Sistema.
- Sánchez Morales, M.^a Rosario (2002). Biogenética y Biotecnología: Tendencias de evolución en el siglo XXI. In: J. F. Tezanos; J. Bordas; A. López and M. R. Sánchez-Morales (eds.). *Estudio Delphi sobre tendencias científico-tecnológicas*. Madrid: Editorial Sistema.

RECEPTION: May 17, 2023

REVIEW: September 28, 2023

ACCEPTANCE: November 15, 2023

Tendencias de futuro de la ingeniería genética y la biotecnología

Future Trends in Genetic Engineering and Biotechnology

María Rosario H. Sánchez Morales

Palabras clave

Biotecnología
• Efectos sociales
• Ingeniería genética humana

Key words

Biotechnology
• Social Effects
• Human Genetic Engineering

Resumen

Los desarrollos en ingeniería genética humana y biotecnología han tenido y tienen evidentes alcances para la sociedad. Hecho que se explica porque sus herramientas de trabajo son gametos, embriones, células germinales, genes, etc. y, junto a usos benefactores, pueden coexistir usos inapropiados. Las secuelas para la especie humana, la organización social y para el propio modelo de sociedad son importantes. En este texto se presentan los principales resultados de una investigación acometida por el Centro de Investigaciones Sociológicas en el año 2021 en el que, a través de una encuesta Delphi, se consultó a 25 expertos en la materia, quienes nos proyectaron sus principales líneas de evolución que, como veremos, tienen notables repercusiones sociales.

Abstract

Developments in Human Genetic Engineering and Biotechnology have had and continue to have a strong impact on society. This is due to the fact that their working tools include gametes, embryos, germ cells and genes, which may have both beneficial and inappropriate uses. These uses have significant consequences for the human species, for social organisation and for the very model of society. This text presents the main results of research undertaken by the Centre for Sociological Research (Centro de Investigaciones Sociológicas) in 2021 whereby a Delphi survey was administered to 25 experts in the field who identified the main areas of development, which have notable social repercussions.

Cómo citar

Sánchez Morales, María Rosario H. (2024). «Tendencias de futuro de la ingeniería genética y la biotecnología». *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, 187: 147-158. (doi: 10.5477/cis/reis.187.147-158)

La versión en inglés de esta nota de investigación puede consultarse en <http://reis.cis.es>

María Rosario H. Sánchez Morales: UNED-CIS | msanchez@poli.uned.es



INTRODUCCIÓN

El objetivo de la ingeniería genética humana es modificar la información genética (ADN) que se incluye en las células, generando moléculas de ADN recombinante. En el campo de la salud, la ingeniería genética no humana (biotecnología) permite la fabricación de productos farmacológicos, así como de vacunas (varias de las vacunas contra la COVID-19 fueron generadas por esta vía) o antibióticos. Destacan la farmacogenética (Prior-González *et al.*, 2011: 41-49) y la farmacogenómica (Pierna-Alvárez *et al.*, 2019: 147-154), que tratan de identificar los medicamentos que se ajustan mejor a los perfiles genéticos de los enfermos

La biotecnología, es definida por la Federación Europea de Biotecnología como:

[...]el uso integrado de la bioquímica, la microbiología y la ingeniería genética para poder aplicar las capacidades de microorganismos, células cultivadas animales o vegetales o partes de estos en la industria, en la salud o en los procesos relacionados con el medio ambiente.

Habiendo sido la solución para mitigar el SARS-CoV-2.

Comencemos por la ingeniería genética humana. Su aplicabilidad ha causado dilemas éticos de relevancia, en tanto en cuanto caben intervenciones en los seres humanos, tanto con fines terapéuticos (diagnósticos genéticos, terapias celulares...) como de un posible perfeccionamiento de la raza (transhumanismo)¹ (Feito-Grande, 2010: 73-91). Enfrentándonos a un modelo de medicina predictiva, regenerativa e individualizada, en un contexto de convergencia tecnológica, con un papel fundamental de las tecnologías de la información y la comunicación. Especial notabilidad adquieren, como decíamos, los diag-

nósticos genéticos (preimplantacionales, prenatales, posnatales), las terapias celulares (la más prometedora posiblemente sea la terapia génica), la utilización de células troncales (terapia celular) y, eventualmente, la clonación con fines terapéuticos. Debiéndose contextualizar, en cualquier caso, dentro de una ética de la salud pública.

Para estudiarlo y discernir sobre sus posibilidades a futuro, a lo largo del año 2021 el Centro de Investigaciones Sociológicas (CIS) realizó un *Estudio Delphi sobre Tendencias en Ingeniería Genética y Biotecnología* (CIS, 2021), del que expondremos sus principales resultados, comparándolo con estudios previos del Grupo de Estudio sobre Tendencias Sociales (GETS), no sin antes detallar la metodología empleada. Lo haremos así por ser los únicos disponibles para el caso español. Permite darles continuidad y observar las tendencias de evolución a lo largo de tres décadas.

METODOLOGÍA

Tal como se detalla en la ficha técnica del estudio del CIS:

La metodología Delphi se ha utilizado en este caso para determinar la probabilidad de que acontezcan determinados eventos y cambios, y para evaluar su importancia en un horizonte temporal estimado en una década para las grandes tendencias, y en lapsos más precisos para cada una de las innovaciones específicas consideradas (horizontes 2025, 2030, 2035, 2050) (CIS, 2021).

Se juzgó la más adecuada al efecto del estudio por disponer en nuestro país de expertos de la más alta cualificación en este ámbito, por lo que se elaboró una *Encuesta Delphi sobre tendencias en Ingeniería genética y Biotecnología*. Los pasos metodológicos seguidos fueron: 1) la discusión del cuestionario por el equipo de investigación; 2) la obtención de pruebas de contrastación; y 3) el envío al grupo de expertos. Entre los seleccionados había profesores de

¹ El transhumanismo es una ideología que propone construir un ser humano, más sano, inteligente y liberado de todas las patologías, incluyendo la muerte.

universidad, científicos, médicos e investigadores de primer nivel con alta especialización en el área.

Se preparó, en buena medida, a partir de informaciones obtenidas en los estudios previos del GETS. Una vez perfilado, se llevaron a cabo varias entrevistas-piloto, con la finalidad de verificar la idoneidad de las preguntas y de los diversos asuntos planteados (entre el 20 y el 28 de febrero de 2021). Constaba de diferentes modalidades de preguntas. En algunas se pidió el pronóstico o la tendencia respecto del tema considerado, indicándose, en su caso, junto a la pregunta y como orientación para los expertos, el dato actualizado sobre lo consultado en la fecha del envío de la primera circulación de los cuestiona-

rios. En dos apartados de estos se pedía la seguridad en sus respuestas en una escala del 1 (mínima) al 5 (máxima), así como la importancia estimada de los efectos sociales de los sucesos en la misma escala. Además, sobre cada uno de los mismos podían plantear observaciones, comentarios...

Había otras preguntas en las que se trataban temas generales; con preguntas abiertas precodificadas que facilitaron las respuestas en la segunda circulación de las encuestas. El tiempo estimado de cumplimiento de las mismas, dada su complejidad, se estimó en torno a 40 minutos. La primera se envió entre el 15 y el 18 de marzo de 2021 a 138 expertos, obteniéndose 25 respuestas.

TABLA 1. Nivel de cobertura de las encuestas

Número total de encuestas teóricas (primera circulación)	Número total de respuestas primera circulación	% de respuestas	Número de respuestas de segunda circulación	% de respuestas
138	25	18,1	25	100

Fuente: CIS (2021). Estudio Delphi sobre tendencias en Ingeniería Genética Humana y Biotecnología.

Fueron analizados, estableciéndose la mediana, el primer y el tercer cuartil, además de preguntarles por la seguridad en la previsión de sus respuestas y la importancia y repercusión de los eventos. Con las informaciones de la primera circulación se elaboró la encuesta de la segunda circulación. Incluyéndose las respuestas de los expertos, junto con los comentarios generales de cada una de las previsiones. Asimismo, se recogían sus primeras estimaciones, solicitándoles que las confirmasen o las modificasen, en función de las contestaciones del resto de los participantes.

El segundo se les remitió entre los días 8 y 21 de junio, adjuntándose las respuestas personales de la primera circulación, así

como un listado de las principales observaciones emitidas por el resto del grupo. A la segunda circulación respondieron 25 expertos, finalizando la recogida de estos el 14 de julio. Una vez recepcionados se obtuvieron, entre el 15 y el 30 de julio, los datos (medianas, primer y tercer cuartil de las respuestas).

Entre los cuestionarios de la primera y segunda circulación se constataron cambios y matizaciones de las previsiones y de los horizontes temporales, en relación con las apreciaciones iniciales vertidas por los expertos. El rigor de esta investigación es una garantía de su fiabilidad, posibilitando plantear tendencias y proyectar sus repercusiones sobre las sociedades y las personas a corto, medio y largo plazo.

TENDENCIAS DE EVOLUCIÓN DE LA INGENIERÍA GENÉTICA Y LA BIOTECNOLOGÍA

Las tendencias de evolución de la ingeniería genética humana y la biotecnología son presentadas a partir del *Estudio Delphi sobre Ingeniería genética y Biotecnología 2021* del Centro de Investigaciones Sociológicas (CIS), estableciendo comparaciones, tal como indicamos anteriormente, con los datos obtenidos en el *Quinto Estudio Delphi sobre Ingeniería genética y Biotecnología (2015)*, el *Cuarto Estudio Delphi sobre Ingeniería genética Humana y Biotecnología (2011)*, el *Tercer Estudio Delphi sobre Biogenética y Biotecnología (2005)*, el *Segundo Estudio Delphi sobre Biogenética y Biotecnología de 2002* (Sánchez-Morales, 2002: 211-262) y en el *Primer Estudio Delphi sobre Biogenética de 1996* (Sánchez-Morales, 1997: 89-186), del Grupo de Estudio sobre Tendencias Sociales (GETS).

Nos centraremos en la presentación de tres de sus principales líneas de evolución, particularmente de aquellas con mayores repercusiones sociales: 1) desarrollos y aplicaciones en investigación en inge-

nería genética humana y en biotecnología; 2) diagnósticos y sondeos génicos, y 3) nuevas terapias y terapia génica.

Desarrollos y aplicaciones en investigación en ingeniería genética y en biotecnología

En 2013, siendo presidente de los Estados Unidos Obama, se puso en marcha el *Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies* y en Europa se emprendió el *Human Brain Project* centrados, desde la neurociencia, en el conocimiento del cerebro humano. Esta línea de investigación se incorporó, por primera vez, en la encuesta Delphi de 2015 del GETS. En aquella fecha los expertos mencionaron con una seguridad media (3), al tiempo que lo valoraron de gran importancia (4) la «finalización de los primeros mapas funcionales del cerebro» para 2035. En 2021 coexistían dos puntos de vista: los que atribuían que «ya se podría hacer, al menos parcialmente» y para quienes «la complejidad del cerebro humano no permitirá que los descubrimientos científicos tengan una aplicación clínica inmediata».

CUADRO 1. Aplicaciones de la investigación en ingeniería genética y biotecnología

2035

- Aplicación clínica de los primeros mapas funcionales del cerebro*.
- En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizarán dispositivos nanotecnológicos para diagnosticar y curar enfermedades (microcápsulas que contengan genes, proteínas, etc.)
- En más del 50 % de los centros sanitarios de España, se implantarán habitualmente dispositivos electrónicos y materiales sintéticos dentro del cuerpo humano (ojos biónicos, órganos sintéticos...).
- Más del 50 % de los medicamentos se diseñarán en base a los conocimientos de la genómica.
- Más del 50 % de los tratamientos farmacológicos se prescribirán tras haber realizado un estudio farmacogenético al paciente.
- Existencia de sangre artificial*.

Nota: * Previsión hecha por primera vez por los expertos.

Fuente: CIS (2021). Estudio Delphi sobre Tendencias en Ingeniería Genética Humana y Biotecnología.

Dos de las principales líneas de evolución de la ingeniería genética y la biotecnología que sugirieron los expertos en 2021 son las referidas a que, hacia 2050, con una

logía que sugirieron los expertos en 2021 son las referidas a que, hacia 2050, con una

seguridad media en las previsiones de (3), «en España el 50 % de los medicamentos que se diseñarán lo harán en base a los conocimientos de la genómica» (50 % en la encuesta de 2011 y un 60 % en la de 2005), y a que «en España el 50 % de los tratamientos farmacológicos que se prescribirán se harán tras hacer un estudio farmacogenético al paciente» (30 % en el Delphi de 2011 y 60 % en el de 2005). Las observaciones de los entrevistados sobre los medicamentos diseñados en base a la genómica aludieron a que «se trata de un campo complejo y a que el avance será muy lento». Participando que: «es el avance o la tendencia hacia la medicina individual o personalizada».

En los estudios Delphi del GETS de 2005, 2011 y 2015, así como en el de 2021 del CIS, se recogió que aparecerán medicamentos basados en la genómica, y medicamentos a la «carta» tras estudios farmacogenéticos² de los pacientes, dotándolos, en ambos casos, de bastante importancia social. Si, con una seguridad media (3), se planteó en 2015 que en 2035 el 35 % los medicamentos serían de este cariz, en 2021 se mostraron más optimistas al trazar que en el 2035 más del 50 % serán fruto de los conocimientos en genómica. Se produjo un efecto de contracción temporal, habida cuenta de que en 2011 y 2015 se esbozó el horizonte de 2050. Justipreciaron que conllevará «[...] una revolución en este importante campo de investigación clínica», cuya potenciación dependerá de decisiones políticas. Nos sitúa, consecuentemente, ante medicamentos diferentes, que llevarían a curaciones definitivas, puesto que conocer, en su integridad, el papel de los genes en la expresión de lo patológico supondrá un antes y un después en la historia de la farmacología.

² La farmacogenética «[...]pretende utilizar la variación en las secuencias de genes y sus efectos en la variabilidad a las respuestas frente a los medicamentos...» (Muñoz, 2001: 43).

Incluimos en 2021 el acontecimiento de que: «En más del 50% de los centros sanitarios de España se implantaran habitualmente dispositivos electrónicos y materiales sintéticos dentro del cuerpo humano (ojos biónicos, órganos sintéticos...)». Con una seguridad media en la previsión (3) y evaluando de alta la importancia social de sus repercusiones (4), preciaron que será una realidad en 2035 (coincidiendo con los resultados del GETS de 2015). Prefiguraron que «[...]la generación de dispositivos electrónicos bio-integrados mejorará rápidamente y su posible implantación en el cuerpo humano está cada vez más cerca».

Los conocimientos sobre el cerebro humano, el cáncer/es, la biotecnología aplicada a la fabricación de medicamentos, la genómica, la nanotecnología y la farmacogenética nos conducen a un escenario prometedor en el campo de la salud. Los «medicamentos a la carta», y el «ser humano nanotecnológico (*cyborg*)» han de contemplarse desde diversos puntos de vista: 1) apreciando sus beneficios sobre la salud y la calidad de vida humana; 2) atendiendo a las desigualdades en lo que su acceso se refiere, y 3) valorando los riesgos coligados.

Diagnósticos y sondeos génicos

Los diagnósticos/sondeos genéticos, en sus variantes, son piezas clave en la nueva medicina preventiva y curativa que se bosqueja en el siglo XXI. En 2002 los participantes en el Delphi del GETS dispusieron más allá de 2050 que «la mayor parte de las entidades bancarias, compañías de seguros y de salud concederían sus servicios tras sondeos genéticos de sus clientes». Esta tendencia se adelantó en los Delphi de 2005 a 2025, coincidiendo con la estimación de 2011. En 2015 se conjeturó 2030, con una alta seguridad en el diagnóstico (4), al tiempo que participaban de la percep-

ción de que tendría una importancia social del más alto grado (5)³. En 2021 valoraron, añadiéndose a la formulación original: «[...] para detectar, por ejemplo, enfermedades como el coronavirus», a la par que «[...]sería necesario un cambio en cuestiones relativas a la ética social, debiendo haber normas que lo permitieran». Según decían: «alcanzar dicha situación generaría una sociedad de castas, con lo que legalmente supondría instaurar la desigualdad..., [...] resultando espeluznante».

Se propuso a los encuestados que emitieran sus opiniones sobre en qué horizonte temporal: «En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizarán análisis epigenéticos para detectar o combatir enfermedades inducidas por la contaminación ambiental». En 2021 tuvieron claro que sería en 2035, con una seguridad de su previsión e importancia social media (3). Existían dos posiciones: los que apuntaban que «no está demostrado que tengan un interés médico» y para quienes «el conocimiento sobre las modificaciones epigenéticas avanzará en los próximos años gracias a técnicas de secuenciación cada vez más potentes y asequibles».

A mediados de los noventa del siglo pasado científicos británicos (Loveridge *et al.*, 1996) previeron que, entre 2000 y 2004 un 10 % de los diagnósticos laborales serían genéticos. En el Delphi de 2011 del GETS, coincidentes con las previsiones emitidas en 2002 y 2005, manifestaron que no parecía fueran a extenderse los análisis genéticos a los trabajadores, con el fin de detectar predisposiciones a padecer enfermedades genéticas a consecuencia del desempeño de su trabajo en el medio laboral. Aventajaron que en 2050 el 20 % de las empresas los ejecutarían. En 2015 opina-

ron que en 2035 el 5 % y que en 2050 representarían el 13 %. En 2021 este tema se formuló así: «¿En qué horizonte temporal en España más del 50 % de las empresas realizarán a sus trabajadores análisis periódicos epigenéticos⁴, con el fin de detectar predisposiciones a padecer enfermedades genéticas a consecuencia del desempeño de su trabajo?». Refirieron que será un hecho en 2035, con una seguridad e importancia social media (3). Enjuiciaron, además, que fueran epigenéticos es discutible y que: «[...] las implicaciones legales y éticas demandan que no se haga... (si bien) [...] en caso de establecerse abre una puerta a una situación de indefensión de la población ante las empresas» (véase cuadro 2).

Si hay un común denominador en los Delphi internacionales de las últimas décadas es que la genética clínica adquirirá un papel de altura. Según apuntaron los consultados en 2021, con una seguridad media (3), en España en 2035 «[...] más del 50 % de los centros de primera asistencia dispondrán de consultas de medicina genética» (en 2015 estimaron el 15 %). Se adelanta, por tanto, en el tiempo, despuntando lo que «significará la normalización de estos tratamientos, sobre todo para la Medicina Personalizada de Precisión (MPP)» (véase cuadro 2).

Visionarios en este contexto como Karl Kötschau ya en un libro de 1935 titulado *Der Aufbau einer biologischen Medizin (La edificación/construcción de una medicina biológica)* (Kötschau, 1935), con cierto descreimiento, insertó una lámina sobre el médico del mañana, en donde se veía a un clínico sentado, ante lo que sería hoy en día un ordenador interactuando con un paciente.

³ Internacionalmente hay tres posiciones legislativas: 1.º Autorización sin restricciones; 2.º Utilización limitada en casos de que el cliente quiera contratar una póliza muy elevada; y 3.º Prohibición.

⁴ Por epigenética se entiende el estudio de las mutaciones en la función de los genes que son hereditarias y no fruto de alteraciones de la secuencia de ADN.

CUADRO 2. Previsiones sobre diagnósticos genéticos

2030	2035
<ul style="list-style-type: none"> — En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizarán habitualmente marcadores moleculares y genéticos para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades monogenéticas. — En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizarán habitualmente marcadores moleculares y genéticos para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades poligenéticas. — En la mayor parte de los centros sanitarios de España se realizarán habitualmente, diagnósticos genéticos preimplantacionales para seleccionar embriones con fines terapéuticos. 	<ul style="list-style-type: none"> — La mayor parte de las entidades bancarias, compañías de seguros y de salud en España solo concederán sus préstamos, pólizas y seguros médicos tras análisis genéticos de sus clientes para detectar, por ejemplo, enfermedades como el coronavirus. — En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizarán análisis epigenéticos para detectar o combatir enfermedades inducidas por la contaminación ambiental*. — Más del 50 % de las empresas realizarán a sus trabajadores análisis periódicos epigenéticos, con el fin de detectar predisposiciones a padecer enfermedades genéticas a consecuencia del desempleo de su trabajo*. — Más del 50 % de los centros de primera asistencia dispondrán de consultas de medicina genética.

Nota: * Previsión hecha por primera vez por los expertos.

Fuente: CIS (2021). Estudio Delphi sobre tendencias en Ingeniería Genética Humana y Biotecnología.

Las nuevas terapias y terapia génica

Una de las más controvertidas posibilidades en ingeniería genética humana es la que se refiere a los usos de células madre embrionarias⁵ y la clonación terapéutica⁶. Debe diferenciarse entre la utilización de células troncales de tejidos u órganos de adultos o células de embriones humanos. A la luz de las predicciones de 2021, con una seguridad media en el pronóstico (3), los encuestados anticiparon descubrimientos con células madre embrionarias. En concreto, previeron que en 2035 «en la mayor parte de los hospitales en España, se utilizarán habitualmente células madre embrionarias para la regeneración de órganos como el riñón, el hígado...» (coincidiendo con las predicciones de 2015). Según puntualizaban «[...] los tratamientos basados en células embrionarias dependen más de las consideraciones éticas... que de las dificultades

tecnológicas que implican», dependiendo, en todo caso, de decisiones políticas (véase cuadro 3).

Una aplicación específica sobre la que solicitamos su opinión fue sobre si «en la mayor parte de los hospitales de España se utilizarán habitualmente células madre de la zona del “limbo corneal” para curar la ceguera». La distinguieron, con una seguridad media (3), dotándola de importancia media en lo que a sus repercusiones sociales se refiere (3). Apreciaron que «es un tema muy de actualidad, que se está complementando con la reprogramación celular de otros tipos de ceguera» y que «[...] los prejuicios morales dificultarán las aplicaciones médicas de las células madre» (véase cuadro 3).

En 2035 (2035, asimismo, en 2015), con una seguridad elevada (4), al tiempo que recalcaron que tendría una gran importancia social (4): «En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizará habitualmente la terapia génica para la curación de enfermedades de base genética y no solo para casos aislados». Su ejecución dependerá, según expresaron, de variables económicas, técnicas, legislativas y de orden moral (véase cuadro 3).

⁵ Cuestión ligada a la discusión sobre el estatuto ético del embrión humano.

⁶ La clonación no reproductiva se refiere a «la aplicación de técnicas de clonación [...] con objeto de establecer cultivos de tejidos —y si fuera posible, de órganos—...» (Comisión Nacional de Reproducción Humana Asistida, 1998: 65).

CUADRO 3. Previsiones sobre nuevas terapias y la terapia génica

2030	2035	2038	2050
<ul style="list-style-type: none"> – En España en más del 50 % de los tratamientos de cáncer se utilizarán anticuerpos (2050 en 2015). 	<ul style="list-style-type: none"> – En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizarán habitualmente células madre embrionarias para la regeneración de órganos como el riñón, el hígado... – En la mayor parte de los centros sanitarios de España se utilizarán habitualmente células inducidas (IPS) para el tratamiento de enfermedades como el párkinson, de riñón, de hígado, etc. – En la mayor parte de los hospitales de España se utilizarán habitualmente células madre de la zona del «limbo corneal» para curar la ceguera. – La mayor parte de los centros sanitarios de España realizará habitualmente la terapia génica para la curación de enfermedades de base genética y no solo para casos aislados. – La edad media de vida alcanzará los cien años como consecuencia, entre otros factores, de los avances en genética humana. – En más del 50 % de las enfermedades se utilizarán para su tratamiento los perfiles proteómicos de los pacientes. – En más del 50 % de las enfermedades se utilizarán para su tratamiento los perfiles de microbiota de los pacientes. – En España existirán dianas terapéuticas para más del 50 % de los tumores (2050, el 30 % en 2015). – En España los hospitales trasplantarán habitualmente corazones de personas fallecidas, que serán reconstruidos utilizando células troncales de pacientes vivos*. – En España se curarán enfermedades neurodegenerativas como el párkinson (utilizando células troncales u otros procedimientos)*. – En España se curarán enfermedades neurodegenerativas como el alzheimer (utilizando células troncales u otros procedimientos)*. 	<ul style="list-style-type: none"> – En España los hospitales implanarán habitualmente órganos artificiales (corazones, riñones, hígados, etc.) realizados con polímero y material biológico humano*. 	<ul style="list-style-type: none"> – En más del 50 % de las enfermedades se utilizarán para su tratamiento los perfiles proteómicos de los pacientes. – En más del 50 % de las enfermedades se utilizarán para su tratamiento los perfiles de microbiota de los pacientes*.

Nota: * Previsión hecha por primera vez por los expertos.

Fuente: CIS (2021). Estudio Delphi sobre tendencias en Ingeniería Genética Humana y Biotecnología.

Tras la finalización del Proyecto Genoma Humano en abril de 2003 se abrió una importante línea explorativa en biomedicina. Por un lado, la proteómica, objetivada en la identificación de las proteínas y su funcionamiento y, por otro, la genómica, orientada al estudio de las funciones, interacciones y expresión de los genes. Según los consultados, en 2035, con una seguridad media

en el pronóstico (3) y arbitrando de «básicamente importantes» (4) las repercusiones sociales que pudieran derivarse, «en más del 50 % de las enfermedades se utilizarán para su tratamiento los perfiles proteómicos de los pacientes» (en 2050, en 2015). Según nos relataron «es un abordaje muy importante[...] una esperanza», que exigirá de «[...] un abaratamiento del proceso y una

estandarización del análisis» (véase cuadro 3).

Las mejoras en biología molecular han ahondado en los mecanismos generadores del cáncer, su progresión, invasión y metástasizarian, hasta el punto de haber sido descubiertas numerosas alteraciones moleculares de las células neoplásicas. Dos vías para el tratamiento del cáncer que han demostrado eficacia son la utilización de dianas terapéuticas y de anticuerpos monoclonales. Los expertos en 2021 previeron que en 2035 «en España existirán dianas terapéuticas para más del 50 % de los tumores» (con una seguridad media e importancia social media de 3) (el 29 % para 2035 en la encuesta de 2015). Se observa una subida del nivel de confianza respecto a las contingencias de la genómica. En 2021 hubo razonamientos contrapuestos: mientras un sector estipuló que «el avance en el conocimiento médico permitirá en breve que la gran mayoría de los tumores dispongan de tratamientos específicos», otros relataron que «[...] aunque se está investigando mucho sobre este tipo de enfermedades, parece que irá lento» (véase cuadro 3).

Por otro lado, la utilización de anticuerpos (inmunoterapia)⁷ en el tratamiento/curación del cáncer es otra alternativa curativa con gran porvenir. Anticiparon que en 2030 «[...] en España en más del 50 % de los tratamientos del cáncer se utilizarán anticuerpos» (el 20 % en la encuesta de 2015), delatándose consideraciones dispares. Si para algunos «la inmunoterapia avanza a paso de gigante y en un plazo temporal medio se dispondrá de anticuerpos frente a una gran parte de los tumores» para otros: «[...] habrá que buscar alternativas paralelas» (véase cuadro 3).

⁷ «Los anticuerpos monoclonales se utilizan para tratar muchas enfermedades, incluido... (diversos)... tipos de cáncer...». Disponible en: <https://www.cancer.org/es/tratamiento/tratamientos-y-efectos-secundarios/tipos-de-tratamiento/inmunoterapia/anticuerpos-monoclonales.html>, acceso 5 de mayo de 2023.

Igualmente, en 2035 trazaron que: «en España los hospitales trasplantarán habitualmente corazones de personas fallecidas, que serán reconstruidos utilizando células troncales de pacientes vivos», que «en España se curarán enfermedades neurodegenerativas como el párkinson (utilizando células troncales u otras técnicas)» y que: «En España se curarán enfermedades neurodegenerativas como el alzheimer (utilizando células troncales u otros procedimientos)». En los tres casos la seguridad fue media (3), enjuiciando de bastante importancia (4) el abordaje terapéutico del párkinson y del alzheimer. Sobre la primera cuestión expusieron que «a la dependencia de recursos y políticas se unen aquí las necesarias dimensiones éticas y dependerá de si aparecen otras alternativas más viables o eficientes». Respecto a la curación del alzheimer distinguieron que «[...] es más complicado que el párkinson» por tratarse, «[...] quizá de una enfermedad muy plurifactorial» (véase cuadro 3).

Un tema colateral se conecta con que, conjeturalmente, en 2038 «los hospitales implantaran habitualmente órganos artificiales (corazones, riñones, hígados...) realizados con polímero y material biológico humano». La seguridad en el diagnóstico de los encuestados fue de 3, precisando, globalmente, que tendrá bastante importancia social (4). Determinaron que «la producción de órganos artificiales depende más de las consideraciones éticas de una parte de la población con respecto a la investigación con células madre que de las dificultades tecnológicas».

Derivado de lo anterior cobra especial significación, a medio plazo (2035), que «la edad media de vida alcance los ciento veinte años o más como consecuencia, entre otros factores, del avance de la biogenética» (coincidiendo con la predicción del estudio de 2015 para los 100 años). Mayoritariamente expusieron una argumentación que reproducimos por su interés socioló-

gico: «[...] aumentarán, seguro, las expectativas de vida y [...] será necesario revertir o impedir el envejecimiento celular de todo el cuerpo, en particular, del cerebro». Si bien, no creen que la edad tope de los 120 se lleve a superar. Sería «[...] sobre todo como efecto de una medicina integradora y pluridisciplinar y de políticas sociales adecuadas».

Nos enfrentamos, por tanto, a un modelo de medicina regenerativa, con especial notabilidad de las terapias celulares. Más la medicina regenerativa precisa de la interconexión de variadas disciplinas: la biología celular, la inmunología, la investigación clínica, la *transplantología*, la ingeniería de tejidos y las terapias celulares. Facultará, previsiblemente, en la curación de patologías como el cáncer, la ceguera, en materia de trasplantes... y conllevará una elevación de la edad media de vida en el siglo XXI.

REFLEXIONES FINALES

La ciencia y la tecnología son dinamizadoras clave del cambio social, trascienden su propio marco y son esenciales en la mayoría de las actividades cotidianas de la vida de los seres humanos. Particularmente, las repercusiones sociales de la ingeniería genética y la biotecnología han hecho necesario que las investigaciones que se acometan a la hora de estudiar sus implicaciones sean interdisciplinarias. Sus avances se suceden ininterrumpidamente, aunque no involucren a todos los ciudadanos del planeta. La experiencia vivida con la pandemia de la COVID-19 y la aparición de diversas vacunas, algunas novedosas en vacunología, son una muestra de los tiempos con los que nos manejamos en este terreno.

La presentación de su futuro requiere prudencia, por lo que juzgamos imprescindible contrastar las opiniones de los expertos. La prospectiva es en sí misma tarea compleja, por la propia naturaleza de las

investigaciones y por el hecho de encadenar discusiones que involucran a otras esferas del conocimiento y del saber. Nos encontramos en ciernes de la quinta revolución industrial, cuya protagonista será la inteligencia artificial que, en conexión con la nanotecnología, la ingeniería genética y la biotecnología llevará a la fusión humano-máquina, presentada como una oportunidad para «crear» un nuevo ser humano con mayores capacidades y habilidades.

De ahí la importancia de efectuar estudios prospectivos como el que aquí hemos presentado en sus principales resultados. Trascendimos los datos meramente científicos, puesta la mirada en anticipar a la propia comunidad científica, a los investigadores sociales y a la opinión pública las repercusiones de estos avances sobre las sociedades y los seres humanos a futuro.

BIBLIOGRAFÍA

- CIS (2021). *Estudio Delphi 2021 sobre Tendencias Sociales, Políticas y Económicas, Tendencias Científico-Tecnológicas y Tendencias en Salud Mental*. Estudio n.º 11002. Madrid: Centro de Investigaciones Sociológicas. Disponible en: https://www.cis.es/cis/opencm/ES/1_encuestas/estudios/ver.jsp?estudio=14607, acceso 22 de abril de 2023.
- Comisión Nacional de Reproducción Humana Asistida (1998). *I Informe Anual*. Diciembre.
- Feito-Grande, Lydia (2010). Investigación con células troncales y tecnologías de mejora humana: tendencias en el debate ético y social. En: M. Moreno Muñoz (coord.). *Perspectivas en la investigación con células troncales. Aspectos científicos, éticos, sociales y legales*. Granada: Editorial Comares.
- Grupo de Estudio sobre Tendencias Sociales. Disponible en: <https://grupogets.wordpress.com>, acceso 10 de abril de 2023.
- Kötschau, Karl (1935). *Zum Aufbau einer biologischen Medizin*. Stuttgart: Hippokrates-Verlag.
- Loveridge, Denis; Georghiou, Luke y Neveda, María (1996). *United Kingdom Technology Foresight Programme Delphi Survey*. Manchester: The University of Manchester.

- Muñoz, Miguel (coord.) (2010). *Perspectivas en la investigación con células troncales. Aspectos científicos, éticos, sociales y legales*. Granada: Editorial Comares.
- Pierna, María; Marcos-Vadillo, Elena; García-Berrocal, Belén e Isidoro-García, María (2019). «Farmacogenómica: la medicina personalizada». *Revista del Laboratorio Clínico*, 12(3).
- Prior-González, Oscar A.; Garza-González, Elvira; Fuentes de la Fuente, Hugo A.; Rodríguez-Leal, Celina; Maldonado-Garza, Héctor J. y Bosques-Padilla, Francisco J. (2022). «Farmacogenética y su importancia clínica: hacia una terapia personalizada segura y eficiente». *Medicina Universitaria*, 13(50).
- Sánchez-Morales, M.^a Rosario (1997). Aproximación prospectiva a la Biogenética. En: J. F. Tezanos; J. A. Díaz-Martínez; M. R. Sánchez-Morales y A. López (eds.). *Estudio Delphi sobre tendencias científico-tecnológicas en España*. Madrid: Editorial Sistema.
- Sánchez-Morales, M.^a Rosario (2002). Biogenética y Biotecnología: Tendencias de evolución en el siglo XXI. En: J. F. Tezanos; J. Bordas; A. López y M. R. Sánchez-Morales (eds.). *Estudio Delphi sobre tendencias científico tecnológicas*. Madrid: Editorial Sistema.

RECEPCIÓN: 17/05/2023

REVISIÓN: 28/09/2023

APROBACIÓN: 15/11/2023

