

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

LA UNIVERSIDAD ANTE UNA SOCIEDAD
HIPERTECNIFICADA:
LECCIONES TRAS CUARENTA AÑOS DE
DOCENCIA E INVESTIGACIÓN

ÚLTIMA CLASE IMPARTIDA POR EL PROFESOR Y ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. MANUEL DOBLARÉ CASTELLANO

EL DÍA 3 DE JUNIO DE 2026



Universidad Zaragoza



Real Academia de Ingeniería

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

LA UNIVERSIDAD ANTE UNA SOCIEDAD
HIPERTECNIFICADA:
LECCIONES TRAS CUARENTA AÑOS DE
DOCENCIA E INVESTIGACIÓN

ÚLTIMA CLASE IMPARTIDA POR EL PROFESOR Y ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. MANUEL DOBLARÉ CASTELLANO

EL DÍA 3 DE JUNIO DE 2026



Universidad Zaragoza



REAL ACADEMIA de INGENIERÍA

Editado por la Universidad de Zaragoza
© 2026, Universidad de Zaragoza
Manuel Doblaré Castellano
Impreso en España

ÍNDICE

PREFACIO	1
I. UN MOMENTO CRÍTICO PARA LA HUMANIDAD	5
I.1. Una bifurcación histórica	5
I.2. Hacia una sociedad hipertecnificada: oportunidades, retos y peligros ..	7
II. LA UNIVERSIDAD ANTE UNA SOCIEDAD HIPERTECNIFICADA.....	15
II.1. Enseñar en la era de la información ilimitada y ubicua. La tutela, el legado invisible	15
II.2. Sobre el mérito en la universidad	20
II.3. La investigación pilar fundamental de la función universitaria	24
II.4. La investigación en la España de hoy	29
II.5. La Universidad como agente del desarrollo social	34
II.5.1. Transferencia de tecnología	35
II.5.2. Formando a los ingenieros del futuro	39
II.5.3. La divulgación de la ciencia y las humanidades	41
II.5.4. La universidad como referencia crítica	43
III. LECCIONES QUE HE APRENDIDO	47
III.1. Investigación y formación transdisciplinar	47
III.1.1. Un ejemplo de investigación transdisciplinar. Modelado de la homeostasis y la epigenética desde una perspectiva de mecánica de sólidos deformables.....	50
III.2. El papel del azar. Mi vida en una cáscara de nuez	62
III.3. Lecciones que he aprendido. Un último mensaje para los más jóvenes	80
EPÍLOGO	89
REFERENCIAS	97

PREFACIO

“Often when you think you're at the end of something, you're at the beginning of something else.”

Fred Rogers

Antes de comenzar, quiero dar las gracias a todos los presentes por hacer el esfuerzo para acompañarme en este día tan especial que mis compañeros y amigos han organizado. Gracias a ellos por la idea, el esfuerzo y el cariño que me han demostrado, así como por conseguir que este acto se celebre en el aula más importante, más histórica, y más hermosa de la Universidad a la que he estado vinculado los últimos 42 años.

Hoy no traigo ecuaciones ni problemas para resolver. Tampoco tengo la intención de hablar de Álgebra Tensorial o Mecánica de Sólidos Deformables no lineal como temía Fany, modelos de inteligencia artificial como le hubiese gustado a Elías, o tecnologías para la sostenibilidad para dar gusto a mis amigos de Abengoa Research. Tras más de cuarenta años dando clase, he pensado que, en esta última, podía permitirme algo distinto, hablar no de lo que sé, ni de lo que he hecho, sino de lo que he aprendido. Porque, después de una vida dedicada a la docencia, uno descubre algo que no imaginaba cuando comenzó: que ha sido más alumno que profesor.

Oyendo a quienes me han precedido, a los que agradezco profundamente sus palabras, pero mucho más su amistad, debo de ser una persona excepcional. Nada más lejos de la realidad. Lo poco o mucho que he conseguido ha sido debido a cuatro razones principales, algunas completamente ajenas a mi voluntad. La primera y principal ha sido, sin

duda, la dedicación incondicional y sin fisuras de mi esposa, Conchi, algo que tendré ocasión de agradecer en el apartado final. La segunda, aprender de grandes profesores, desde las primeras fases de mi educación, hasta la excelencia de mis mentores, mis compañeros y estudiantes en la universidad. La tercera razón, que sí he intentado de forma deliberada, ha sido rodearme de personas mejores que yo, como ha quedado demostrado en las intervenciones anteriores. Esto garantiza el éxito profesional y el crecimiento personal. Finalmente, otro elemento que, obviamente, no ha dependido de mí, pero sí ha sido esencial, se refiere a la fortuna. La tuve cuando nací en una familia que me inculcó el ansia por aprender, y la responsabilidad de no desperdiciar el talento recibido. También al poder estar cerca de mentores sabios y generosos, y trabajar junto a colegas y estudiantes brillantes, que ampliaron mis horizontes.

Recuerdo con nitidez mi primera lección como profesor en la escuela de ingenieros de Sevilla donde estudié. Estaba nervioso. Mucho más de lo que dejaba entrever, aunque menos que hoy. Llevaba las notas cuidadosamente preparadas, y los problemas resueltos, y creía yo, que entendidos. Pensaba que enseñar significaba demostrar que sabía mucho, que controlaba la asignatura hasta sus menores matices, respondiendo sin dudar las preguntas formuladas. El respeto, creía entonces, nacía de la seguridad con la que uno llenaba la pizarra. Tardé años en comprender que la autoridad verdadera nace de algo más profundo: de la coherencia, de la honestidad intelectual, y de reconocer que también uno está aprendiendo y por tanto puede equivocarse.

En los próximos minutos trataré precisamente de ordenar parte de lo que he aprendido y compartir algunas convicciones que he ido madurando con los años. No pretendo ofrecer recetas ni verdades definitivas; tampoco

realizar un ejercicio de memoria complaciente. Solo hacer una reflexión honesta sobre lo que para mí significa hoy la función universitaria. Mi objetivo, por tanto, no es cerrar una etapa con solemnidad, sino que pensemos juntos, de forma distendida e informal, sobre el papel de nuestra institución en este momento crítico de la historia. Sin embargo, dado el carácter científico de este encuentro, no podré sustraerme completamente a presentar una pequeña muestra de los últimos estudios en nuestro grupo, referidos al modelado de los efectos de los cambios epigenéticos en la evolución del cáncer. Trataré de cualquier forma de centrarme en los aspectos menos formales, para favorecer la comprensión a una audiencia tan heterogénea.

I. UN MOMENTO CRÍTICO PARA LA HUMANIDAD

"It has become appallingly obvious that our technology has exceeded our humanity."

Albert Einstein

I.1. Una bifurcación histórica

Es tentador interpretar cada época como excepcional. Sin embargo, la nuestra posee rasgos que justifican la sensación de estar ante una *bifurcación histórica*. Pocas generaciones han experimentado transformaciones tan rápidas, tan globales e interconectadas como las actuales. La velocidad con la que cambian nuestras herramientas, nuestros sistemas productivos, nuestras relaciones, y nuestras condiciones ambientales no tiene precedentes en la experiencia humana [1,2]. No se trata solo de un cambio tecnológico o de una crisis coyuntural, sino de una *convergencia de transformaciones* —tecnológicas, geopolíticas, ambientales y culturales—, *que está dando lugar a un momento extraordinario y, al mismo tiempo, profundamente inquietante*.

La narrativa de la historia humana está intrínsecamente ligada al avance tecnológico. Desde el uso controlado del fuego, los metales y la imprenta, hasta la máquina de vapor, o las comunicaciones distribuidas, las innovaciones han transformado sociedades, economías y culturas. Durante casi trescientos mil años, el progreso material apenas se alteró. La renta per capita, uno de los indicadores más fiables de nuestro desarrollo, permaneció prácticamente estancada, prisionera de la trampa malthusiana [3].

Por el contrario, en los últimos tres siglos hemos asistido a un crecimiento exponencial de la riqueza, de la productividad y de nuestra capacidad para transformar el entorno. Como resultado, una hora de trabajo en los países

del G7 produjo en 2021 24 veces más en media en bienes y servicios con respecto a 1870. Este gran incremento viene esencialmente asociado a la generación de nuevas formas de trabajo, resultado de lo que hoy llamamos ciencia, y su implementación generalizada derivada de la utilización intensiva del capital. En la Revolución Industrial, la ciencia se imbrica con la tecnología, acelerando el proceso mediante la innovación sistemática. Esta ha sido, y sigue siendo, el gran impulso de nuestro progreso. *Innovar es imaginar lo que no existe, convertir el conocimiento en soluciones, asumir riesgos, y atreverse a introducir cambios que mejoran nuestra vida cotidiana. Paul Romer decía que la ideas son la materia oscura del crecimiento* [4].

Sin embargo, *la era actual se caracteriza no solo por el cambio, sino por su ritmo de evolución y su efecto simultáneo sobre una gran variedad de tecnologías* [5].

Ente los factores más relevantes que están impulsando esta aceleración, y en primer lugar, se encuentra *la velocidad de procesamiento y almacenamiento de datos*, que proporciona la infraestructura fundamental para el resto. Ahora, es posible procesar y extraer información de enormes conjuntos de ellos, que antes eran inmanejables [6].

En segundo lugar, *la conectividad ubicua* a través de internet y los dispositivos móviles acelera la difusión de la información, la innovación y los cambios de comportamiento. Las ideas y las aplicaciones pueden propagarse casi instantáneamente, generando rápidos cambios en la aparición, difusión y adopción de nuevas tecnologías, y en las tendencias culturales y sociales [7,8].

En tercer lugar, la *inteligencia artificial* (IA) representa un cambio de paradigma. En pocos años hemos pasado de herramientas simples, a sistemas capaces de generar textos, imágenes, diagnósticos médicos y tomar decisiones con un grado de sofisticación que parece propio de la ciencia ficción. La IA está transformando de forma radical sectores

enteros, desde la medicina hasta la industria, desde la educación a la investigación científica [9,10].

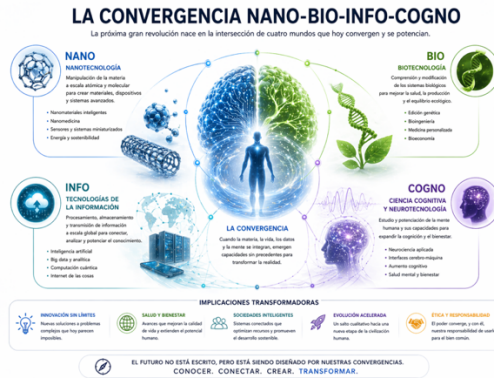


Figura 1. La convergencia tecnológica, clave en la velocidad de cambio.

En cuarto lugar, debemos citar *la convergencia* tecnológica [11]. Campos como la biotecnología, la nanotecnología y las neurociencias están cada vez más interrelacionados con las tecnologías de la información. La sinergia entre estos dominios (a menudo denominada convergencia nano-bio-info-cogno) amplifica la complejidad y el impacto potencial de sus avances respectivos [12]. Ray Kurzweil acuñó la "ley de los rendimientos acelerados", argumentando que el progreso tecnológico en diversos ámbitos se retroalimenta, conduciendo a un crecimiento exponencial potencialmente en todos los campos, que él denominó *Singularidad* [13].

I.2. Hacia una sociedad hipertecnificada: oportunidades, retos y peligros

Las disrupciones sociales derivadas de esta aceleración ya son palpables. *Las tecnologías digitales* han transformado la comunicación, la formación de

comunidades y la propia identidad personal. Las plataformas de redes sociales conectan a miles de millones de personas, pero contribuyen a la polarización, la desinformación, y a una nueva alienación [14,15]. Las preocupaciones sobre la privacidad de los datos, el capitalismo de vigilancia [16], y el sesgo algorítmico que permea decisiones cruciales son cada vez más prominentes [17]. La confianza social y la propia percepción de la realidad están bajo presión.

La automatización, impulsada por la robótica y la IA está desplazando el trabajo cognitivo y manual rutinario, lo que genera preocupación por un desempleo generalizado [18,19], que podría escalar drásticamente provocando un aumento de la desigualdad hasta niveles insostenibles [20, 21].



Figura 2. Una bifurcación histórica que puede conducir a la singularidad [9].

La *inteligencia artificial* abre oportunidades extraordinarias para el análisis, la innovación, y la mejora de la salud y la calidad de vida, pero también genera riesgos enormes [22]. La dependencia de sistemas de IA complejos y opacos puede conducir a una pérdida de autonomía y comprensión, delegando decisiones críticas en sistemas automatizados con objetivos poco transparentes [22, 23]. La IA avanzada podría habilitar nuevas formas

de armamento autónomo, y con ello conducir a una escalada incontrolable de conflictos [24]. Su combinación con el reconocimiento facial y la vigilancia ubicua puede dar lugar a un control social sin precedentes [25]. La concentración de poder en quienes controlan las tecnologías está creando élites globales que podrían llegar a ser inexpugnables [26]. Finalmente, la irrupción de la Inteligencia Artificial General plantea interrogantes sobre el papel y el futuro de la propia especie [27].

Los avances previstos en *computación y comunicación cuánticas* revolucionarán campos que dependen de cálculos complejos, como la ciencia de los materiales, la climatología, el descubrimiento de fármacos, o la criptografía [28]. Sin embargo, también plantea cuestiones sobre la privacidad, y la concepción del tiempo y del espacio [29].

La *nanotecnología* permite pensar en materiales de propiedades únicas en cuanto a resistencia, abrasión o durabilidad, dispositivos electrónicos más pequeños, rápidos y eficientes, mejoras en el almacenamiento de energía, sistemas de administración inteligente de fármacos, materiales conductores biocompatibles y, en definitiva, un control de la materia sin precedentes [30]. Pero también conlleva riesgos como los nanorrobots autorreplicantes o el desarrollo de nuevas armas o herramientas de vigilancia indetectables [31].

Los avances en *biotecnología, genómica, biología sintética, y su convergencia con la IA y la nanotecnología*, pueden conducir a una medicina altamente personalizada, y una prolongación radical de la vida saludable [32]. Dario Amodey, fundador de Anthropic, cree que la IA puede multiplicar por diez la velocidad de progreso de la biotecnología, con herramientas como AlphaFold o AlphaProteo [33], acuñando la expresión “Siglo XXI comprimido”, según la cual, en 5-10 años se avanzará lo que la biología y la medicina hubiesen avanzado sin ellos en todo un siglo. Sin embargo,

también incorporan graves peligros, como la liberación accidental o deliberada de un patógeno altamente virulento, que podría tener consecuencias muy superiores a las de las pandemias naturales [34]. De la misma forma, existe la posibilidad de que la ingeniería genética cree una brecha entre humanos mejorados y no mejorados, lo que modificaría fundamentalmente las estructuras sociales y la noción de igualdad [35], planteando profundas cuestiones éticas, y la reevaluación de lo que significa ser humano [27].

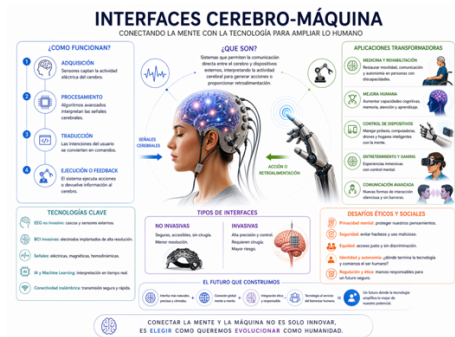


Figura 3. Interfaces cerebro-máquina, un futuro cercano.

Las *neurociencias* prometen curar enfermedades neurodegenerativas y neuromusculares que llevan asolándonos desde siempre, así como otorgarnos nuevas capacidades cognitivas, pero el potencial de disrupción psicológica y social derivado de las realidades virtuales inmersivas, y de las interfaces cerebro-computadora podría alterar nuestra identidad y libre albedrío [36].

La *fusión nuclear*, siempre a veinticinco años vista, parece que está resolviendo definitivamente los enormes problemas que exige su eficiencia y control. Disponer de reactores de fusión seguros garantizaría la provisión

prácticamente ilimitada de energía limpia, con un costo reducido, con materiales de fácil acceso, y tiempos de decaimiento radiactivo muy cortos. Sin embargo, hay que asegurar que esta tecnología no se limite a unas pocas empresas o países, como pasó con la fisión, y desde luego, que no se extienda la posibilidad de su uso militar [37,38].

En conclusión, *los beneficios potenciales de esta aceleración son inmensos*. Podemos esperar soluciones a grandes desafíos de la humanidad, como la cura del cáncer o el Alzheimer, una esperanza de vida saludable considerablemente más larga, energía sostenible para revertir el cambio climático, eliminar el hambre y la pobreza, expandir la presencia humana más allá de la Tierra y dar lugar a nuevas formas de creatividad, abriendo una nueva era de prosperidad y bienestar sin precedentes [39]. Sin embargo, *los peligros asociados son igual de profundos*, incluyendo amenazas existenciales como colapsos sistémicos [40], el control externo de nuestras acciones, e incluso la posibilidad de una total extinción humana [41,42].

Si la transformación tecnológica redefine nuestras capacidades, la *evolución geopolítica* recrea nuestro entorno de seguridad y cooperación. El retorno de conflictos armados de alta intensidad, en regiones que parecían estabilizadas, ha quebrado la ilusión de un progreso irreversible hacia la paz y la integración. El orden internacional surgido tras la segunda mitad del siglo XX se encuentra sometido a tensiones profundas, por no decir a su revisión completa. La fragmentación de alianzas, la rivalidad entre potencias, la tecnología como factor de competencia geoestratégica y la erosión de los organismos multilaterales generan un clima de incertidumbre que afecta directamente a nuestra prosperidad [43].

Otro gran desafío que define nuestro tiempo es *el cambio climático* y, en un sentido más amplio, *la presión creciente sobre los sistemas naturales* del planeta. El modelo de desarrollo que ha permitido los extraordinarios avances que

disfrutamos ha generado también impactos ambientales significativos. A diferencia de las tensiones geopolíticas, que pueden fluctuar en intensidad, la alteración de los equilibrios climáticos responde a procesos acumulativos y de largo plazo. Estos cambios nos recuerdan que *el crecimiento indefinido en un sistema finito es físicamente imposible* [44,45]. La ingeniería y el desarrollo tecnológico han sido parte importante del problema, pero son también imprescindibles para la transición hacia modelos más sostenibles [46,47]. *No tenemos por qué renunciar al progreso como plantean algunos, pero, sin duda, sí hemos de redefinirlo.*



Figura 4. *Un cambio climático zimparable?*

Aunque las previsiones agoreras sobre el futuro pueden inducir al pesimismo, éste no tiene por qué ser necesariamente negativo. La historia muestra que los periodos de mayor incertidumbre pueden ser también los de mayor creatividad. *No estamos ante un colapso inevitable, ni ante una utopía garantizada, sino ante un abanico de posibilidades.* Que la bifurcación en la que nos encontramos se incline hacia el progreso, el bien común, y la mejora del planeta depende de las decisiones políticas, los marcos legales y las estrategias que adoptemos, mientras que la pasividad ante una transformación tan profunda es posiblemente la vía más peligrosa.



Figura 5. La tecnología ha de estar constreñida por la ética.

Para asegurar que nos dirigimos por el camino correcto, *se necesitan nuevos marcos éticos y estructuras de gobernanza y cooperación globales*, ya que estas tecnologías no respetan las fronteras nacionales. Es evidente que normar tecnologías de rápida evolución como la seguridad de la IA, las armas autónomas y la bioseguridad, es difícil, y, a menudo, su regulación va a la zaga de su desarrollo e implementación [48], pero ello no implica que no se trabaje en esta línea, ya que es la única forma de evitar el abuso de los más ricos o fuertes, y la confirmación de muchos de los peligros antedichos.

II. LA UNIVERSIDAD ANTE UNA SOCIEDAD HIPERTECNIFICADA

En este escenario de incertidumbre y ciertamente convulso, en esta transición histórica, la universidad debe reafirmar su función como espacio de reflexión, de debate informado y de formación integral. La institución universitaria ha sobrevivido nueve siglos porque ha sabido adaptarse sin renunciar a su esencia. Como nos demostró Darwin: “*no es la especie más fuerte o inteligente la que sobrevive, sino la que mejor se ajusta a los cambios del entorno.*” [49].

II.1. Enseñar en la era de la información ilimitada y ubicua. La tutela, el legado invisible

"A teacher is one who makes himself progressively unnecessary."

Thomas Carruthers

Uno de los cambios más profundos que he observado a lo largo de mis más de cuarenta años de docencia universitaria no está relacionado con los planes de estudio, ni con la aparición de nuevas metodologías pedagógicas, ni con la creciente especialización, sino con la naturaleza misma del conocimiento y de su acceso.

Cuando comencé mi formación universitaria, la información era escasa y su búsqueda constituía una parte esencial del aprendizaje. Conseguir un artículo requería paciencia y, en ocasiones, desplazamientos físicos y esperas de meses. Las mejores universidades presumían de sus bibliotecas y de su capacidad de acceso a las revistas científicas más valoradas. Pero el estudiante aprendía también mientras buscaba, ya que debía discriminar

fuentes, y organizar y sintetizar el conocimiento disponible. Ese proceso de búsqueda, aparentemente lento e ineficiente, ayudaba sin embargo a desarrollar criterio.

Hoy la situación es radicalmente distinta. *Vivimos en una época caracterizada por la disponibilidad casi ilimitada, inmediata y ubicua de la información.* Nunca en la historia había sido posible consultar bibliotecas enteras en cuestión de segundos, desde cualquier lugar del planeta y en cualquier momento. Además, encontramos la información organizada en múltiples formatos, e indexada por algoritmos sofisticados capaces de sintetizar múltiples fuentes de información y generar explicaciones completas.



Figura 6. Información ilimitada, ubicua e instantánea.

Sin embargo, esta extraordinaria abundancia plantea una paradoja que afecta directamente al núcleo de la misión universitaria: *la acumulación de datos no garantiza una comprensión profunda.* Comprender una teoría matemática, dominar un modelo físico o interpretar correctamente un resultado experimental requieren procesos de maduración intelectual que ninguna herramienta puede sustituir.

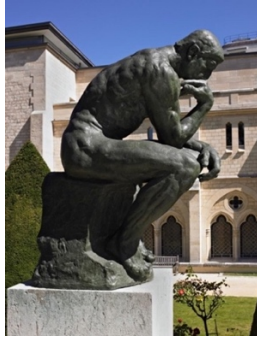


Figura 7. *El pensador de Rodin. Hay que enseñar menos contenido y más a pensar.*

Es cierto que los sistemas de inteligencia artificial permiten analizar grandes bases de datos, explorar soluciones a problemas complejos, simular fenómenos físicos con rapidez, o identificar patrones invisibles para la mente humana. Pero al mismo tiempo, plantean riesgos evidentes, como ya he apuntado. Si se utiliza como sustituto del esfuerzo intelectual, puede fomentar una forma de aprendizaje superficial. Si se pone al servicio de una mente crítica, la potencia. *En la era de la inteligencia artificial, el valor diferencial no está en recordar datos, que un sistema puede generar automáticamente, sino en entender sus supuestos, sus límites y sus implicaciones.*

La cuestión no es, por tanto, si la inteligencia artificial debe incorporarse a la enseñanza universitaria —algo inevitable— sino cómo hacerlo de manera que fortalezca y no debilite la formación intelectual de los estudiantes. En última instancia, *el verdadero riesgo de la inteligencia artificial no es que las máquinas piensen demasiado, sino que los seres humanos pensemos demasiado poco* [50].



Figura 8. *Enseñar en el mundo de la inteligencia artificial.*

Durante siglos, el profesor fue el mediador casi exclusivo del saber. Hoy, si la información está disponible en todas partes, ¿qué papel debe desempeñar éste? Hemos de asimilar que la información a la que el alumno puede acceder es mucho mayor que nuestro propio conocimiento, por lo que, más que un proveedor de datos, el maestro ha de convertirse en guía. *Educar ya no es solo transmitir información, sino enseñar a pensar, a dudar, a equivocarse y reconocerlo, en un proceso de mejora continua.*

En consecuencia, la universidad debe cambiar su método docente, integrando la inteligencia artificial para reducir la carga menos creativa, y *fomentando al mismo tiempo la capacidad de formular preguntas genuinamente nuevas, de trabajar en las fronteras entre disciplinas, de dialogar con otros lenguajes — científicos, tecnológicos, y humanísticos—*. Además, no basta con formar profesionales competentes; es necesario formar ciudadanos capaces de pensar críticamente en un contexto de disrupción constante, y comprender las implicaciones éticas y sociales de sus decisiones. Para ello, es vital un elemento que las nuevas tendencias de formación a distancia parecen olvidar, la relación directa profesor-alumno. *La mentoría, cuando se ejerce con rigor y generosidad, constituye el motor más relevante del progreso intelectual y científico.*

Aunque se suele medir el éxito académico de un profesor mediante indicadores cuantificables —publicaciones, proyectos, citas—, éstos, sin duda necesarios, no capturan la dimensión humana de la tarea docente. La huella más duradera de un profesor se encuentra en la transformación intelectual y personal de quienes han pasado por sus aulas. *Los artículos envejecen, las teorías se revisan, los modelos se refinan, pero las personas amplían, desarrollan y transmiten lo que han aprendido.* Es por ello por lo que, tras más de cuarenta años de docencia e investigación, he llegado a una convicción que en mis primeros años no habría formulado: *el verdadero legado de un profesor, aunque menos visible, no son sus artículos, ni sus proyectos y trabajos, sino sus alumnos.* Como señalé en un artículo reciente junto a mi buen amigo, Shahzada Ahmad, sobre la formación de investigadores, el objetivo del mentor no debe ser producir seguidores obedientes, sino formar científicos comprometidos con su profesión, su institución, y la sociedad en general, y capaces de superar a su maestro [51].



Figura 9. *El legado más importante de un profesor son sus alumnos.*

II.2. Sobre el mérito en la Universidad

"A meritocracy is only as good as the fairness of the competition it oversees."
Chris Hayes

Como he tratado de dejar claro en las páginas anteriores, el mayor mérito de un profesor reside en los alumnos que ha formado, si bien, como veremos, también incorpora como obligaciones el contribuir al acervo de conocimiento de la sociedad con los resultados de su investigación, mejorar al bienestar de sus semejantes, y ser un referente moral. Todo ello constituye un cúmulo de obligaciones que solo pueden cumplirse con el esfuerzo y dedicación que son inherentes a la vocación. No es de extrañar pues que la sociedad exija a sus profesores y, en general a toda la comunidad universitaria, un plus de mérito que, sin embargo, se reconocen escasamente.

De hecho, las palabras “meritocracia” y “elitismo” han adquirido connotaciones ambiguas, cuando no abiertamente peyorativas, en el debate público contemporáneo. Sin embargo, el DRAE define el término “élite” como minoría selecta o rectora, no designa por tanto a una clase privilegiada, ni a un grupo cerrado de personas que acceden al poder por razones heredadas o arbitrarias. Se refiere a aquellas personas que destacan por su talento, su esfuerzo o sus logros, y que, gracias a esa combinación de cualidades, contribuyen de manera significativa al progreso científico, tecnológico, cultural o económico de la sociedad.

En sociedades como la nuestra, poco dadas a reconocer que el éxito puede provenir del esfuerzo, la dedicación y la honestidad profesional, resulta habitual atribuir el éxito a factores externos —el azar, la cuna, las relaciones personales o incluso prácticas menos confesables—, antes que al trabajo sostenido o a la capacidad individual. Esta actitud cultural, profundamente

arraigada en nuestro país, termina generando un clima social poco favorable al reconocimiento del mérito y, por extensión, al desarrollo de una verdadera cultura de excelencia. Sin embargo, como me dijo un buen amigo, hoy presente, “cuando veas a alguien en la cima de una montaña, no pienses que lo ha llevado un helicóptero”.



Figura 10. *Compromiso entre meritocracia y solidaridad.*

Curiosamente, esta realidad se acepta con naturalidad en algunos ámbitos y se cuestiona en otros. Nadie considera injusto que un músico excepcional disponga de oportunidades para perfeccionar su arte o que un deportista destacado reciba recursos específicos para alcanzar su máximo rendimiento. En esos casos, entendemos con claridad que el talento requiere apoyo para desplegar todo su potencial y que ese apoyo, lejos de constituir un privilegio injustificado, representa una inversión colectiva en el éxito y el prestigio de la sociedad. Sin embargo, cuando se trata de científicos, ingenieros, investigadores o profesionales altamente cualificados, el término *élite* se utiliza con frecuencia como una descalificación implícita. En lugar de admirar y tratar de emular a quienes destacan por su esfuerzo y su dedicación, se tiende a sospechar de ellos.

Esta actitud refleja una anomalía cultural que termina perjudicando al conjunto de la sociedad, ya que debilita la cultura del esfuerzo y reduce los incentivos para aspirar a niveles elevados de excelencia. *Las sociedades que han alcanzado mayores niveles de desarrollo científico, tecnológico y cultural han sido precisamente aquellas que han sabido identificar, atraer y apoyar a sus mejores talentos.* En ellas, la existencia de “élites” intelectuales y profesionales no se percibe como una amenaza para la igualdad social, sino como una condición necesaria para el progreso colectivo.

Pero reconocer el mérito no implica abandonar el compromiso con la igualdad de oportunidades. Muy al contrario, la meritocracia llevada a su extremo, como nos recuerda Michael Sandel [52], puede llevar a actitudes de soberbia y desprecio por quien no puede alcanzar los mismos objetivos. Ello conduce a reacciones de defensa de aquellos que se consideran minusvalorados. Una meritocracia sana exige garantizar que todas las personas tengan acceso a una educación de calidad y a iguales oportunidades, que les permita desarrollar plenamente sus capacidades, al tiempo que reconoce y promueve el talento allí donde aparece, y entiende que no llegar no implica forzosamente falta de actitud o pereza. El talento está distribuido de forma mucho más amplia que las circunstancias favorables. Cuando una sociedad interioriza esta doble perspectiva, el resultado es un sistema dinámico en el que el esfuerzo, la creatividad y la capacidad intelectual encuentran vías reales de desarrollo, y promueve un engrasado ascensor social, sin abandonar ni despreciar a los que no consiguen o no ambicionan metas elevadas.

Este equilibrio entre mérito y justicia constituye uno de los retos más delicados de cualquier sociedad. Si se privilegia exclusivamente la competencia individual, sin tener en cuenta las condiciones de partida, se corre el riesgo de perpetuar desigualdades sociales. Pero si se diluye el

mérito en nombre de una igualdad mal entendida, se debilita la cultura del esfuerzo que sustenta el progreso intelectual.

El verdadero peligro, por tanto, no reside en la existencia de élites, sino en su selección arbitraria. *Una sociedad que no reconoce ni apoya a sus mejores talentos corre el riesgo de perder competitividad científica, tecnológica y cultural.* Peor aún, puede generar estructuras de poder basadas no en el mérito, sino en el amiguismo, la inercia institucional o la mediocridad organizada. *En paralelo, una sociedad que no mantiene vías adecuadas para el progreso individual independientemente del punto de partida, o fía todo el éxito individual al mérito profesional, tendrá grandes problemas sociales.* Aquellos que consiguen el éxito profesional no deben olvidar que son múltiples las causas que les han permitido llegar, no solo tu talento y esfuerzo, y que, simplemente el hecho de haber podido hacerlo les impone una responsabilidad mayor.

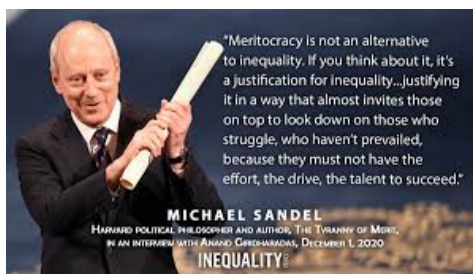


Figura 11. Michael Sandel y “The tyranny of merit”.

En el ámbito universitario, esta cuestión adquiere una relevancia especial. La universidad constituye uno de los principales mecanismos de selección y promoción del talento en las sociedades modernas. De su capacidad para reconocer el mérito y fomentar la excelencia depende, en gran medida, la calidad del sistema científico y tecnológico de un país. Por ello, la universidad debe recompensar el esfuerzo, el rigor intelectual y la

contribución real al conocimiento. No hacerlo genera desincentivos, mediocridad y pérdida de confianza institucional.

Pero *la necesaria meritocracia universitaria debe ser también responsable*. Una universidad verdaderamente justa debe esforzarse por garantizar que el talento pueda desarrollarse con independencia del contexto social de partida. Ello implica la necesidad de ofrecer mecanismos de apoyo a quienes encuentran mayores dificultades, proporcionar orientación personalizada, y crear oportunidades reales para que cada estudiante pueda alcanzar su máximo potencial. Asimismo, los que tienen éxito en este propósito deben ser humildes y generosos con los que no lo hacen.

II.3. La investigación, pilar fundamental de la función universitaria

"The medicines of today are based upon thousands of years of knowledge accumulated from scientific discovery."

John Vane

El informe de la UNESCO titulado "La ciencia al servicio de la sociedad" [53] incluye este párrafo:

"La ciencia es la mayor empresa colectiva de la humanidad. Nos permite vivir más tiempo y mejor, cuida de nuestra salud, nos proporciona medicamentos que curan enfermedades y alivian dolores y sufrimientos, nos ayuda a conseguir agua para nuestras necesidades básicas -incluyendo la comida-, suministra energía y nos hace la vida más agradable, pues puede desempeñar un papel en el deporte, la música, el ocio y las últimas tecnologías en comunicaciones. Finalmente, aunque no por ello menos importante, la ciencia alimenta nuestro espíritu."

El reconocimiento de la importancia de la Ciencia y de su fomento mediante la investigación fue el origen de la universidad humboldtiana, impulsada por Wilhelm von Humboldt a inicios del siglo XIX, como

respuesta a la necesidad de transformar la educación superior en un espacio donde la enseñanza y la investigación estuvieran profundamente unidas [54]. Frente a los modelos previos, centrados en la mera transmisión de conocimientos, este enfoque defiende que el saber debe generarse activamente a través de la investigación científica y el pensamiento crítico, formando individuos capaces de cuestionar, innovar y contribuir al progreso intelectual y social, adaptándose a los cambios de una sociedad cada vez más compleja.

En los últimos 100 años se han producido cambios muy profundos en este modelo, y específicamente, en la forma en que se realiza la investigación. Muchos de ellos han sido positivos; por ejemplo, la inversión global en investigación científica se ha triplicado en lo que va de siglo y en 2019 alcanzó la cifra de 2.2 billones de dólares en el mundo. Ha aumentado el tamaño y multidisciplinariedad de los grupos, y se está produciendo una progresiva integración de equipos públicos y privados que abordan juntos proyectos de enorme envergadura (Human Genome Project, Brain project, ...)[55,56].

Otros cambios, sin embargo, están resultando perniciosos. En muchos sistemas, el objetivo fundamental de la investigación está siendo erosionado por una administración excesiva, y una evaluación y priorización erróneas que encorsetan su desarrollo y limitan los descubrimientos relevantes. En demasiadas ocasiones, el sistema universitario, y particularmente los esquemas de evaluación y los incentivos derivados, inducen a confundir medio y fin. Se cuantifican artículos, índices de impacto, proyectos competitivos, en definitiva, los medios. Todo ello tiene su función y particular relevancia, pero ninguno de esos indicadores constituye por sí mismo el valor de la actividad investigadora. Cuando uno entiende esto, el trabajo adquiere sentido. *La*

investigación deja de ser una carrera para conseguir méritos, y con ellos un puesto de mayor prestigio, y se convierte en una responsabilidad.

La sociedad financia laboratorios, infraestructuras, salarios y programas de formación porque confía en que el conocimiento generado revertirá, directa o indirectamente, en el beneficio colectivo, lo cual no significa que toda investigación deba tener aplicación inmediata. Este es un enfoque miope y contrario a mi visión de la ciencia como ejercicio intelectual, pero sí implica que la investigación debe dotarse de un horizonte de utilidad. Incluso cuando la investigación parece abstracta o altamente formalizada, su justificación última reside en la potencial mejora de las condiciones de vida, incluyendo en estas la satisfacción cultural y artística. *La elegancia matemática es valiosa, la coherencia formal indispensable, pero siempre debe estar presente el objetivo subyacente del bienestar humano.*

Estoy convencido de que *la curiosidad y la responsabilidad son dos de las fuerzas más potentes para generar nuevo conocimiento.* La curiosidad nos impulsa a comprender el mundo, y con ello a descubrir y mejorar; la responsabilidad nos recuerda que nuestra función principal es servir a la sociedad, resolviendo problemas que mejoren nuestra vida, o nuestra concepción del mundo o de la sociedad. *Si la curiosidad explica por qué investigamos, la responsabilidad explica para qué lo hacemos.* La conjunción entre ambas evita dos desviaciones opuestas. Por un lado, respuestas meramente utilitaristas, sin profundidad conceptual. Por otro, que la investigación se convierta en un ejercicio estético desvinculado de la realidad.

La curiosidad no es un lujo intelectual ni una excentricidad académica. Es un rasgo distintivo de nuestra especie. Desde los primeros intentos de comprender el movimiento de los astros hasta los modelos actuales más sofisticados, el impulso inicial ha sido siempre el mismo: ¿por qué? Esta pregunta expresa la negativa a aceptar el mundo físico, social o intelectual

y artístico como un conjunto de hechos sin explicación. Pero en ciencia, no basta con preguntar, es necesario hacerlo con rigor, construir modelos coherentes, contrastarlos con la experiencia y someterlos a crítica. *La curiosidad científica es una curiosidad disciplinada.*



Figura 12. *Charles Darwin y el origen de las especies* [49].

De hecho, la satisfacción intelectual de encontrar una formulación más clara, una interpretación más elegante de un resultado, o una solución más eficiente, constituye un momento de íntima felicidad, y uno de los mayores privilegios de la vida académica. *Tener la oportunidad de aprender y generar conocimiento libremente es, sin duda, un privilegio. Sin embargo, esta prerrogativa conlleva la obligación de compartirlo, ampliarlo y orientarlo hacia el bien común.*



Figura 13. *La investigación, base de la innovación y el desarrollo económico.*

La investigación es la base esencial de la innovación, y con ella de nuestra riqueza. Sin embargo, Según el Innovation Capabilities Outlook de 2026 [57], hemos entrado en un periodo de desaceleración en la mejora de la productividad. Una de las causas de esta ralentización podría tener su origen en la falta de nuevas tecnologías disruptivas, y en una menor adopción y/o beneficio de ellas por parte de la industria y la sociedad.

En un artículo reciente, Nicholas Bloom se pregunta “¿Son las ideas más difíciles de encontrar?” [58]. El aumento de I+D es insuficiente para mantener el ritmo de progreso que hemos disfrutado. Todos hablamos de la ley de Moore para los microprocesadores, pero muy poco de su inversa, la ley de Eroom, que enuncia que, para mantener el ritmo de descubrimiento, hay que multiplicar las horas dedicadas al proceso. En el caso de las ideas, además, es necesario un aprendizaje cada vez más largo para empujar la frontera. Por ejemplo, hemos necesitado multiplicar por 20 el número de investigadores en las últimas décadas

Otros varios factores posibles son la reducción del riesgo de los proyectos financiados [59], o la creciente importancia de las citas como medida del éxito científico [60]. Existen propuestas para revertir esta situación, que pasan por una mayor inversión en I+D, un mayor número de profesores y científicos, la aplicación de más tecnología en el proceso de generación de nuevos descubrimientos, la eliminación de las limitaciones para el acceso al conocimiento y su uso, y, sobre todo, una estrategia más clara para definir la dirección de crecimiento [61].

II.4. La investigación en la España de hoy

"No hay países pobres, sino países ignorantes. Y la mayor ignorancia es no saber que se es ignorante."

Santiago Ramón y Cajal

La investigación en nuestro país ha dado un salto cuántico en los últimos 50 años. En este periodo, han crecido de forma significativa los centros de investigación, el número de investigadores, las infraestructuras y recursos dedicados, la profesionalización y la inserción en el entorno internacional. Ello hace que muchos argumenten y presuman de que la ciencia española está en su mejor momento y al nivel de la mayoría de los países desarrollados, si normalizamos por el producto interior bruto, y, en algunas áreas e indicadores, incluso por encima [62].

Esta visión optimista y poco menos que triunfalista está sin embargo lejos de la verdad. *La cruda realidad es que, salvo excepciones puntuales, nuestra participación en el avance del conocimiento es escasa en relación con nuestra importancia económica, y nuestras universidades compiten mal en investigación* [63].

Si consideramos el número de trabajos científicos publicados, la posición actual de España es buena, pero si nos centramos en las aportaciones al avance del conocimiento fundamental, la situación es bastante peor. Además, la competitividad científica de España se ha ralentizado, quizá debido a la idea equivocada de que nuestra ciencia ya era excelente, lo que ha dado lugar a una política científica, a mi entender y al de muchos, equivocada [63].

Son muchas las razones que conducen a esta ralentización de nuestro progreso científico, y la mayoría de ellas son bien conocidas: i) bajo nivel de inversión en I+D pública y privada; ii) barreras a la movilidad del personal de I+D+i dentro el sector público y entre éste y el empresarial;

iii) gobernanza y gestión muy rígidas; iv) financiación basada en proyectos y consultoría a corto plazo, y no en colaboraciones estratégicas ni en grandes proyectos a largo plazo; v) políticas que favorecen la dispersión frente a la concentración; vi) insuficiente o inadecuada política de atracción y retención de talento; vii) estructuras, políticas e incentivos orientados a la investigación incremental más que a la disruptiva. Aunque todos ellos son importantes y se han descrito suficientemente, en los párrafos siguientes me centraré tan solo en los cuatro últimos ya que, en mi experiencia, son los menos obvios.

La financiación de la investigación pública en España, al margen de su reducida cantidad, está basada de forma casi exclusiva en las convocatorias de proyectos a corto plazo (máximo 4 años), de muy diversa índole y origen de sus fondos. Esta forma de financiación se utiliza en otros países y trata de identificar ideas útiles o rompedoras que generen resultados medibles. El problema no está en la forma en sí, sino en su exclusividad, y en la forma en la que se aplica. El hecho de ser la única opción obliga a los investigadores a dedicar un porcentaje excesivo de su tiempo a escribir propuestas en lugar de hacer ciencia. Además, los resultados de un número tan elevado de peticiones fluctúan en el tiempo, obstaculizando la planificación a largo plazo, y obligando a la contratación de colaboradores quizás innecesarios, o, alternativamente, a su rescisión cuando son más útiles. *Como he defendido reiteradamente, los fondos son necesarios, pero mucho más lo es la continuidad.*

En segundo lugar, mantener la cohesión de grupos grandes exige una labor titánica y constante. Es mucho más sencillo trabajar con objetivos y exigencias limitados, que insertarse en empresas de mayor envergadura, donde dependemos de los demás, y el reconocimiento y la visibilidad individual son menores. Por si fuera poco, la evaluación de un investigador, y por tanto su capacidad para conseguir financiación y

reconocimiento, depende, al margen de otros indicadores, de haber participado en la dirección de proyectos. Ello obliga a los más noveles a emanciparse cuanto antes, para poder aparecer como investigadores principales. Este hecho, unido a la escasa movilidad de los investigadores en España, produce una dispersión prematura de los grupos, en beneficio de la deseable promoción individual. Pero, como comentaremos posteriormente, la colaboración en y con grandes grupos es necesaria para abordar desafíos relevantes y no perder oportunidades. Desafortunadamente, *la universidad española carece de estrategias y medios para crear y mantener grandes iniciativas de colaboración*, con lo que, siguiendo el símil de mi buen amigo José Domínguez: “demasiado habitualmente, la universidad se convierte en el barco donde avezados y esforzados remeros, lo hacen en direcciones distintas, sin ningún control ni dirección, conduciendo a la inmovilidad.”

En tercer lugar, se encuentra la atracción de talento. *No hay mejor inversión para una institución o un país que atraer investigadores de excelencia*. Esta afirmación se ha constatado repetidamente en múltiples informes, que demuestran que el nuevo talento se amortiza en periodos de retorno muy cortos, y ofrece enormes rentabilidades a medio plazo [64]. Afortunadamente, este es uno de los aspectos en los que más hemos mejorado en España. Programas como Ramón y Cajal, Miguel Servet, ICREA, IKERBASQUE, ATRAE, y otros muchos regionales de menor nivel, están cambiando de forma irreversible el panorama de la investigación en España. Aun así, y teniendo en cuenta sus beneficios, es difícil de entender que no se extiendan aún más en cantidad y dispersión geográfica.

Para finalizar, la política probablemente más perniciosa que afecta a la investigación en España se refiere a la evaluación de los resultados de la

investigación, y con ello la promoción e incentivos de los investigadores. Esta se basa de forma determinante en el número de artículos publicados, la cualificación de las revistas en las que estos se publican, y el número total de citas (o indicadores similares).

Sin embargo, hay multitud de trabajos que demuestran científicamente que estos indicadores pueden servir para evaluar, de forma agregada, un país o una gran institución (e.g. una universidad) pero no a un investigador individual. Además, ninguno de estos indicadores mide la investigación disruptiva, sino solo la incremental. Si a ello se une que el riesgo excesivo de los proyectos suele ser penalizado (de forma injustificada, desapareció hace unos años la convocatoria del programa EXPLORA), la consecuencia es obvia: los investigadores tendemos a no asumir el riesgo de publicar poco, y con ello a perder incentivos y oportunidades, a cambio de tener una probabilidad más alta de hacer aportaciones de gran relevancia. Por supuesto, la investigación sobre temas importantes siempre conlleva el riesgo de no acertar, pero como comenta en uno de sus libros Peter Medawar, premio Nobel de Fisiología y Medicina en 1960 por sus trabajos en inmunología: *“quien quiera hacer descubrimientos importantes debe estudiar problemas importantes.”* [65].

El resultado es que *esta gestión de la ciencia ha conducido en los últimos decenios a una hipertrofia de los desarrollos y aplicaciones incrementales, en perjuicio de la exploración de nuevas ideas, de los resultados disruptivos*, y, consecuentemente, de la ratio P_{500} entre las publicaciones situadas en las 500 más citadas en cada ámbito y año, y el total [63,66]. Esta situación afecta a muchos otros países, pero los científicamente periféricos, como el nuestro, son los que más la sufren.

En la tabla 1 se puede observar que 5 países solamente (EEUU, Suiza, Alemania, Reino Unido, y Países Bajos) se encuentran en el centro de la

producción de conocimiento mundial ($P_{500} > 0,09$ y $P_{5000} > 1$), con otro núcleo de países cerca (Australia, Singapur, Dinamarca, ..), mientras que la gran mayoría se encuentra muy lejos, si bien los casos de Japón y China son excepcionales, ya que el primero cuenta con un muy fuerte sector aplicado que aumenta las publicaciones totales distorsionando la ratio, y el segundo que se está acercando rápidamente al centro [67]. España está lejos en ambos casos, con una ratio P_{500} casi 4 veces inferior a la de Portugal, lo que vuelve a avalar la afirmación de que producimos excesivas publicaciones de poco valor.

Tabla 1. Ratio entre el número de publicaciones situadas entre las 5000 y 500 más citadas del mundo y el número de publicaciones totales en los campos de física, química e ingeniería en el periodo 2008-2017 y citas en el periodo 2018-2020 ($\times 1000$) (Nota; Las publicaciones en colaboración con otros países no han contabilizado) [63]

País	5000	País	500
Estados Unidos	1,60	Suiza	0,217
Suiza	1,30	Estados Unidos	0,163
Alemania	1,24	Australia	0,140

Tabla 2. Continuación			
País	5000	País	500
Singapur	1,14	Reino Unido	0,124
Reino Unido	1,08	Países Bajos	0,098
Países Bajos	0,81	Alemania	0,098
Australia	0,74	Singapur	0,073
Nueva Zelanda	0,70	Austria	0,054
Canadá	0,59	Dinamarca	0,054
Dinamarca	0,59	Francia	0,043
Bélgica	0,48	Portugal	0,041
Israel	0,46	Japón	0,032
Suecia	0,45	Canadá	0,028
Austria	0,43	Italia	0,026
Francia	0,38	República de Corea	0,025
China	0,38	China	0,015
Japón	0,33	España	0,009
Noruega	0,32	Nueva Zelanda	0
Finlandia	0,30	Bélgica	0
España	0,26		

Es imprescindible cambiar esta tendencia. Sin dejar de apoyar la investigación incremental, ya que sin ella no es posible la disruptiva, hay que fomentar

simultáneamente la de mayor riesgo. No se trata, como piensan algunos de financiar la “excelencia”, si ésta se mide con los mismos parámetros. Basta con fijarse en algunos de tamaño similar al nuestro, como Suiza o Países Bajos, para copiar cómo proceden.

II.5. La Universidad como agente del desarrollo social

"Higher education is a public good and a strategic asset for sustainable development."

UNESCO

Desde sus orígenes medievales, la universidad ha estado vinculada a la sociedad que la sostiene, pero esa relación ha ido adquiriendo una intensidad y una complejidad muy superiores a las del pasado. *El extraordinario crecimiento del conocimiento científico, la aceleración tecnológica y la creciente interdependencia entre ciencia, tecnología, economía y política han transformado la universidad en un actor central del desarrollo social.*

El conocimiento ha dejado de ser únicamente un patrimonio cultural para convertirse en uno de los principales motores del progreso económico y del bienestar colectivo. *La investigación científica transforma recursos en conocimiento mediante el talento y la creatividad de los investigadores; la innovación, por su parte, transforma ese conocimiento en riqueza, en nuevas tecnologías y en valor social.*

La contribución de la universidad al bienestar, además de la generación y transmisión del conocimiento, adopta otras formas, que pueden agruparse en cuatro grandes funciones: la transferencia de tecnología y conocimiento hacia el sistema productivo, la formación de profesionales capaces de generar innovación y progreso, la divulgación científica y cultural que integra el conocimiento en la sociedad, y su papel de conciencia cívica.

II.5.1. Transferencia de tecnología

Desde la revolución industrial hasta las actuales tecnologías digitales, el desarrollo científico ha transformado profundamente las condiciones materiales de la vida humana, contribuyendo de forma decisiva a la reducción de la pobreza, al aumento de la salud y la esperanza de vida y a la expansión del bienestar en amplias regiones del planeta. *El progreso científico y tecnológico ha demostrado, por tanto, ser uno de los factores más determinantes del crecimiento económico y de la competitividad de los países.*

Sin embargo, la relación entre investigación e innovación no es automática; la primera es condición necesaria, pero no suficiente para la segunda. *Para que el conocimiento se transforme en valor es necesario un ecosistema complejo en el que intervienen empresas, universidades y centros de investigación, instituciones públicas, inversores y emprendedores.*

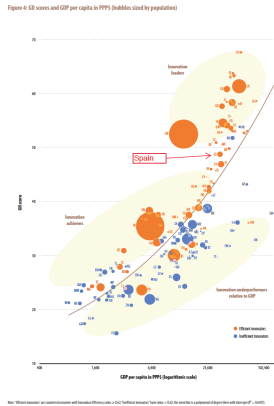


Figure 14. Relación entre el producto interior bruto y el índice global de innovación [68].

En consecuencia, todos los países intentan fomentar la innovación en sus empresas e instituciones mediante acciones como el fortalecimiento de los agentes de innovación y sus interacciones, el acompañamiento a otros actores del ecosistema (por ejemplo, capital riesgo y capital semilla), la provisión de recursos (personas, infraestructuras, etc.), o el apoyo a políticas complementarias como la educación y la difusión, la fiscalidad y la atracción de talento, entre otras.

En España, esta interacción ha sido históricamente, y sigue siendo, muy imperfecta. Es habitual hablar de la paradoja española como una intensificación de la bien documentada paradoja europea, según la cual, a pesar de la calidad de nuestra investigación científica, la capacidad del sistema para generar innovación tecnológica sigue siendo limitada [60]. Sin embargo, como he tratado de establecer anteriormente, este extendido diagnóstico de que España es ineficiente sólo en la transferencia no tiene base empírica. La investigación pública en España es también ineficiente en cuanto a la generación de los conocimientos que sustentan las innovaciones radicales.

En el informe del Índice Global de Innovación de 2025, España ocupó el puesto número 29 entre todos los países, muy por debajo de su capacidad en términos de PIB y supuesta solidez científica [69]. Esta posición refleja algunos síntomas preocupantes del sistema económico español, la mayoría bien conocidos: i) baja productividad; ii) bajos salarios; iii) alto desempleo; iv) bajo nivel educativo; v) bajo rendimiento en producción tecnológica (patentes, bienes y exportaciones de alta tecnología, etc.); vi) pocos ecosistemas con empresas, universidades y centros tecnológicos; vii) escasez de políticas de coinversión público-privada. Esto se debe a que, además de las debilidades ya citadas del sistema de generación de conocimiento, el Sistema Español de Innovación da muestras de otras.

En las empresas: i) escasa cultura de innovación en algunos sectores productivos; ii) tamaño medio reducido de las empresas; iii) limitada inversión empresarial en investigación; iv) bajo nivel de empleo en I+D+i y desarrollo tecnológico; v) escaso número de empresas que participan sistemáticamente en I+D+i; vi) inexistencia o deficiencias en las estrategias de innovación y protección de la propiedad intelectual; vii) baja profesionalidad de los gestores de proyectos de I+D+i; viii) bajo nivel de digitalización e internacionalización; ix) gestión ineficiente del conocimiento propio y baja capacidad de absorción del externo.

En la administración y el entorno socioeconómico: i) educación deficiente en todos los niveles, que no se ajusta a las necesidades de las empresas; ii) aversión al riesgo y con ello escasa creación de empresas de base tecnológica; iii) escaso reconocimiento social de la investigación y la innovación; iii) baja prioridad de la I+D+i; iv) mala coordinación con la Unión Europea y entre comunidades autónomas; v) dificultades en la promoción de tecnologías emergentes; vi) ausencia de instrumentos de financiación flexibles para empresas de base tecnológica; vii) gestión muy rígida y burocrática.

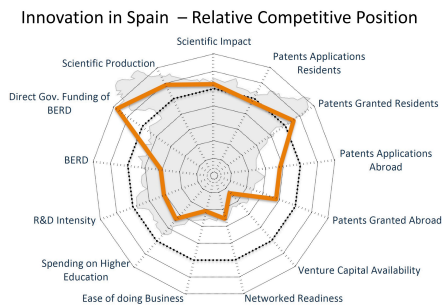


Figura 15. Fortalezas y debilidades de la innovación en España [69].

Para superar todas estas dificultades y mejorar con ello la calidad de vida a largo plazo, *España necesita un acuerdo político y social global para cambiar el modelo educativo, de investigación y productivo, estableciendo la creación de conocimiento valioso, el aprovechamiento del talento individual y organizacional, la sostenibilidad ambiental y la innovación permanente como los principales motores del nuevo modelo de crecimiento del país.*

A pesar de que, en las últimas décadas, ha crecido sustancialmente la conciencia de que el conocimiento generado debe encontrar vías eficaces para traducirse en valor económico y social, *la universidad debe todavía aprender a identificar su potencial de investigación aplicable*, proteger adecuadamente la propiedad intelectual cuando sea necesario y establecer alianzas estratégicas con empresas e instituciones capaces de transformar el conocimiento generado en aplicaciones concretas, y, finalmente, promover la creación de nuevas empresas.

También es necesario que el tejido empresarial incorpore la innovación como parte central de su estrategia competitiva. Las empresas que no invierten en conocimiento están condenadas a competir únicamente en costes, una estrategia difícilmente sostenible en una economía global basada en el valor añadido del conocimiento.

A lo largo de mi trayectoria académica he tenido la oportunidad de participar en diversas iniciativas para fortalecer esta interacción entre universidad y sociedad. Sé, por tanto, de su dificultad, pero también que es posible. La creación de institutos de investigación interdisciplinares, el impulso de proyectos con empresas, la promoción de spin-offs tecnológicas desde la universidad, la creación “ex novo” de una empresa de investigación dentro de un conglomerado multinacional, o la promoción de un ecosistema completo de innovación con centros universitarios, de investigación y tecnológicos, incubadoras de empresas y

la administración, son algunos ejemplos en los que he participado directamente, demostrando que, efectivamente, la universidad puede contribuir de manera activa y decisiva a la generación directa y la promoción de la innovación.

II.5.2. Formando a los ingenieros del futuro

Si la transferencia de conocimiento constituye la forma más visible de interacción entre universidad y sociedad, la formación de los profesionales encargados de su implementación representa probablemente su contribución más profunda y duradera. Las tecnologías cambian, las empresas aparecen y desaparecen, pero las personas formadas en la universidad continúan actuando durante décadas como vectores de conocimiento, innovación y responsabilidad social. En última instancia, *el impacto de una institución académica se mide menos por el número de artículos publicados o de patentes registradas, que por la calidad intelectual y humana de las generaciones que han pasado por sus aulas, y, en particular, por la contribución de éstas a la mejora de las condiciones sociales.*



Figura 16. ¿El ingeniero del futuro?

En el caso particular de la ingeniería, esta responsabilidad adquiere una dimensión especial. El mundo que habitamos, moldeado, habilitado y sostenido, en gran medida, por la tecnología, depende decisivamente de los ingenieros. Ellos traducen las posibilidades científicas a una realidad tangible. Como suelo decir a mis alumnos: *un ingeniero es alguien capaz de proveer soluciones implementables a problemas con información incompleta, y sin el tiempo y el dinero para conseguir una solución óptima.*

Para trabajar de esta forma, los ingenieros del futuro necesitarán ampliar y combinar aspectos como:

- Una sólida base científica y un rigor analítico y cuantitativo que les permita comprender fenómenos complejos, predecir y optimizar utilizando la ciencia, la experiencia y los datos, evaluar críticamente las nuevas tecnologías, y adaptarse a problemas imprevistos.
- Creatividad y capacidad de innovación para abordar los desafíos futuros e impulsar el progreso, creando soluciones innovadoras bajo restricciones de recursos, tiempo, éticas y normativas.
- Un pensamiento sistémico que los capacite para ver los problemas de forma holística, comprendiendo cómo interactúan los diferentes componentes dentro de un sistema.
- Capacidad y disposición para pensar, comunicarse y trabajar eficazmente en diversos campos, colaborando no solo con ingenieros de otras especialidades, sino con científicos, economistas, juristas, sociólogos, legisladores, especialistas en ética y usuarios finales.
- Enfoque a la resolución de problemas para que los sistemas que diseñan funcionen de forma fiable, eficiente y segura.

- Una responsabilidad ética que priorice la seguridad, la salud, el bienestar público, y la gestión ambiental

Todo ello exige un replanteamiento fundamental de los programas de ingeniería, cómo empleamos los métodos pedagógicos y cómo evaluamos el aprendizaje.

II.5.3. La divulgación de la ciencia y las humanidades

Otro ámbito de la relación entre universidad y sociedad que, aunque menos visible que la formación, la investigación o la transferencia tecnológica, resulta igualmente esencial para el funcionamiento de una sociedad avanzada, es la divulgación del conocimiento científico y humanístico.

El conocimiento científico no puede permanecer encerrado en laboratorios o revistas especializadas. Debe integrarse en la cultura general, contribuyendo a formar ciudadanos capaces de comprender el mundo en el que viven y de participar de manera informada en los debates públicos que afectan a su futuro. La divulgación científica cumple precisamente esa función. *Divulgar significa tender puentes entre el conocimiento especializado y la cultura general, entre la investigación académica y la experiencia cotidiana de los ciudadanos.*

En una sociedad democrática, los ciudadanos deben participar en la toma de decisiones que afectan al futuro colectivo. Pero esa participación solo puede ser verdaderamente libre y responsable si existe un nivel suficiente de alfabetización científica. *La divulgación no es, por tanto, una actividad secundaria o meramente ornamental; constituye un componente esencial del funcionamiento de una democracia moderna.*

En este sentido, *la divulgación* constituye una de las formas más nobles de interacción entre universidad y sociedad. No produce valor económico directo, pero *contribuye a* algo igualmente importante: *la construcción de una sociedad instruida, crítica y capaz de comprender el significado de los avances científicos y tecnológicos.*

Esta tarea resulta especialmente importante en una época caracterizada por la creciente influencia de la ciencia y la tecnología en todos los ámbitos de la vida social. Las decisiones políticas relacionadas con la energía, la salud pública, el cambio climático, o la inteligencia artificial requieren una comprensión suficiente de conceptos científicos que hasta hace pocas décadas permanecían restringidos a círculos académicos.

Al mismo tiempo, la divulgación científica desempeña un papel esencial en la formación de nuevas generaciones de científicos e ingenieros. Muchos investigadores han descubierto su vocación a través de libros de divulgación, conferencias públicas o programas educativos que despertaron su curiosidad intelectual en edades tempranas.

Tampoco debemos olvidar que la divulgación no debe limitarse a las ciencias y a la tecnología. Las humanidades desempeñan un papel igualmente esencial en la construcción de una cultura crítica y reflexiva. La historia, la filosofía, la literatura o el arte proporcionan marcos interpretativos que permiten comprender el significado cultural, social y ético de los avances científicos, además de contribuir al patrimonio intelectual de la humanidad.

La separación tradicional entre ciencias y humanidades, heredada en gran medida de las estructuras académicas de la Edad Media resulta cada vez más artificial en el mundo contemporáneo. Los grandes desafíos de nuestro tiempo —el cambio climático, la inteligencia artificial, la biotecnología o la sostenibilidad energética— no pueden comprenderse únicamente desde una perspectiva técnica. Como nos recuerda Charles P.

Snow en su ensayo sobre “*Las dos Culturas*” [70], la imagen distorsionada que las ciencias y humanidades tenían entonces (y, desafortunadamente, siguen teniendo) una de la otra es destructiva, y su reunificación es una necesidad en el sentido intelectual y en el más práctico.

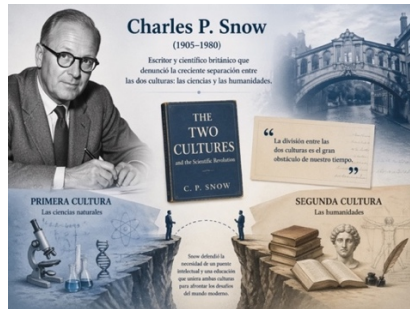


Figura 17. C. P. Snow y “*The two cultures*”.

II.5.4. La universidad como referencia crítica

La universidad no es solo un espacio donde se investigan fenómenos naturales, se elaboran teorías, se forman profesionales cualificados o se promueven innovaciones y mejoras. A lo largo de su existencia, las universidades han atravesado profundas transformaciones que han cambiado sus disciplinas, sus métodos pedagógicos, sus estructuras organizativas e incluso su relación con el poder político y económico. Sin embargo, han mantenido una identidad reconocible, fiel a la idea de que el conocimiento debe cultivarse con rigor, independencia y responsabilidad, y han contribuido de forma decisiva a configurar el horizonte cultural y ético de las sociedades en las que se insertan.

Las instituciones universitarias no solo producen conocimiento; contribuyen también a formar criterio, responsabilidad y conciencia crítica en quienes habrán de asumir en el futuro responsabilidades científicas, técnicas o políticas. Es también, por tanto, una

institución moral en el sentido más profundo del término, un lugar donde se cultivan y se transmiten los valores que hacen posible una vida colectiva basada en la libertad intelectual, la búsqueda de la verdad y la responsabilidad hacia la sociedad. Las universidades también han desempeñado una función esencial como espacios de reflexión independiente, donde se han cuestionado ideas dominantes y se han desarrollado argumentos fundamentados que posteriormente han influido en la evolución de las sociedades.

Esta dimensión ética de la universidad adquiere una importancia particular en nuestra época, caracterizada por profundas transformaciones tecnológicas, geopolíticas y culturales y por el relativismo moral. Sin embargo, en las últimas décadas, la universidad ha tendido a replegarse sobre sí misma, concentrando gran parte de sus energías en dinámicas internas de evaluación, financiación o competencia y posicionamiento institucional. *Durante demasiado tiempo, la universidad ha sido reticente a intervenir con claridad en determinados debates públicos*, lo que ha permitido que el espacio de la discusión social sea ocupado en demasiadas ocasiones por discursos carentes de rigor científico o de responsabilidad intelectual. *Este repliegue ha contribuido a debilitar su papel como referencia crítica en el debate público.*

No puede objetarse que la universidad está compuesta por una pluralidad de opiniones y sensibilidades. Esa diversidad constituye precisamente una de sus mayores fortalezas, pero no debe conducir a una neutralidad paralizante ante cuestiones fundamentales. Existen principios que no pueden ser objeto de negociación coyuntural como la defensa de la libertad, la búsqueda de la verdad y el respeto a los derechos humanos.

La proliferación de pseudocientíficos, tertulianos improvisados, o profesionales de las redes sociales —no todos, por supuesto— es, en parte, una consecuencia de este vacío. En ausencia de una voz académica clara y

accesible, proliferan interpretaciones simplistas o abiertamente erróneas de fenómenos complejos, que afectan directamente al bienestar social. *Recuperar la función crítica de la universidad no implica convertirla en un actor político partidista, sino recordar que el conocimiento tiene una responsabilidad pública que no puede ser ignorada.*

Como consecuencia de la incertidumbre que genera todo lo anterior, *estamos asistiendo a una crisis de confianza en las instituciones.* No solo en el ámbito político, sino también en el científico y educativo. Estamos viendo una vuelta al oscurantismo. La proliferación de desinformación, y la deslegitimación de la verdad y de la autoridad experta aparecen como nuevos factores que parecían olvidados [71,72].

Como conclusión general, no podemos, no debemos limitarnos a reproducir esquemas heredados ni a competir únicamente en métricas. La universidad debe recuperar su misión educativa y no solo formativa, y ejercer su responsabilidad social de voz crítica y faro moral. Por supuesto, debemos mantener el rigor técnico más exigente, pero, al mismo tiempo, la formación que impartimos ha de ser más amplia, integrando conocimientos técnicos con el pensamiento ético y la responsabilidad social. Al contrario de lo que muchos aducen, *la universidad importa hoy más que nunca, si bien es urgente actualizar sus misiones de siempre.*



Figura 18. *Charlatanes pseudocientíficos.*

III. LECCIONES QUE HE APRENDIDO

Como me enseñaron mis mejores profesores, una clase —y quizá también una vida académica— debe terminar con un resumen de su contenido y una introducción al tema siguiente. Las páginas anteriores han sido, en buena medida, una reflexión sobre la universidad en un momento crítico de la historia y sobre el papel que el conocimiento, y su generación y transmisión pueden desempeñar en ese contexto. Este último capítulo pretende resumir, de manera necesariamente imperfecta, algunas de las lecciones que he ido aprendiendo a lo largo de mi vida académica.

Después de casi medio siglo en la universidad, uno comprende que muchas de las cosas verdaderamente importantes no aparecen en los programas de estudio ni en los manuales, sino que se aprenden lentamente, a través de errores, conversaciones, encuentros afortunados y también de fracasos.

III.1. Investigación y formación transdisciplinar

"The core idea of transdisciplinarity is different: it is the integration and even transcendence of disciplinary worldviews."

Julie Thompson Klein

Como sabemos, el progreso científico ha ido acompañado de una creciente especialización. Este fenómeno es comprensible y, en muchos casos, necesario. La lógica reduccionista ha sido extraordinariamente eficaz para descomponer sistemas complejos en partes manejables, y ha permitido avances espectaculares. Además, la complejidad de los problemas actuales exige un dominio profundo de herramientas específicas. Sin embargo, *la*

especialización excesiva conlleva el riesgo de reducir el horizonte intelectual hasta el punto de perder la perspectiva global. Cuando un investigador se limita a optimizar un procedimiento dentro de un marco conceptual que nunca cuestiona, la curiosidad se empobrece. Ampliar su ámbito de actuación le permite anticipar consecuencias, identificar analogías y reconocer patrones que no son evidentes desde una perspectiva estrecha.

En mi discurso de ingreso en la Real Academia de Ingeniería reflexionaba sobre el tránsito desde el reduccionismo clásico hacia enfoques más holísticos y transdisciplinarios [73]. En él insistía en que *reduccionismo y holismo no son antagónicos, sino perspectivas complementarias.* La transdisciplinariedad, tal como señalaba Nicolescu y como desarrollaba en mi discurso, no elimina las disciplinas, más bien las clarifica y complementa [74]. La clave está en saber cuándo profundizar y cuándo integrar.

Hace un tiempo tuve la ocasión de leer un libro de Michael Gibbons y otros colaboradores con título: “The New Production of Knowledge”. En él se hipotetiza que los problemas realmente complejos a los que se enfrenta la humanidad: cambio climático, eliminación de residuos, escasez de recursos vitales, mejora de la salud, y enfermedades letales y crónicas, exploración espacial, y un sinnúmero más, solo pueden solucionarse mediante el concurso coordinado de grandes grupos multidisciplinares y multiinstitucionales, capaces de integrar perspectivas diversas. Argumentan los autores que las grandes transformaciones del conocimiento que se han conseguido, y de forma mucho más acentuada y rápida en la actualidad, no son obra de individuos aislados, sino de comunidades de investigación [75].

Los grandes problemas no respetan fronteras nacionales, institucionales o disciplinares, sino que, por el contrario, requieren la colaboración de científicos, ingenieros de distintas disciplinas, economistas, juristas,

políticos, filósofos, y un sinfín más de especialistas de centros de investigación, universidades, empresas e instituciones varias. Los equipos internacionales y transdisciplinarios no son, por tanto, una opción cosmética, sino una estructura necesaria para avanzar en la solución de los grandes desafíos actuales. *La transdisciplinariedad no es una moda académica, sino una necesidad estructural del conocimiento contemporáneo.*

Es cierto que *trabajar en las fronteras implica aceptar incomodidad, aprender lenguajes nuevos, reconocer ignorancia en campos ajenos y exponerse a errores, pero también abre espacios de innovación y puertas a descubrimientos inesperados.* El crecimiento intelectual rara vez ocurre donde estamos cómodos, sino cuando cambiamos de entorno, cuando colaboramos con personas formadas en tradiciones distintas, cuando abordamos nuevas disciplinas y metodologías. *La zona de confort es cómoda, pero estéril.*

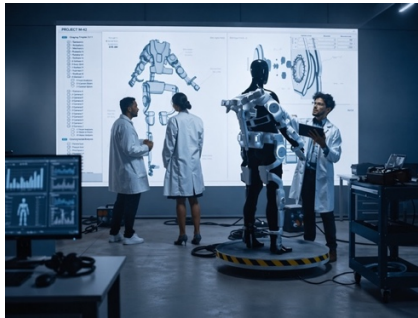


Figura 19. *La multidisciplinariedad, elemento imprescindible para resolver retos complejos.*

Personalmente, he tenido la oportunidad de comprobar que *los avances más interesantes suelen surgir de la conexión inesperada entre ámbitos distintos.* Los campos más activos, como demuestra la segunda ley de la termodinámica, se encuentran en las interfaces. En mi propia experiencia, el paso hacia la Biomecánica y la Mecanobiología supuso precisamente trasladar

herramientas de la mecánica de sólidos al comportamiento tisular, dialogar con biólogos y médicos, reinterpretar modelos clásicos en un contexto nuevo. Cada uno de esos movimientos implicó inseguridad inicial, adaptación y, en ocasiones, fracaso parcial. Pero también ampliaron mi mirada y mis capacidades.

También he defendido la necesidad de saber y aprender de todo y de todos. Historia, Economía, Arte, Ética, Filosofía, otras culturas y formas de entender la vida no son adornos culturales, sino ampliaciones de nuestras habilidades. La Historia proporciona perspectiva, la Filosofía obliga a formular preguntas fundamentales, la sensibilidad estética refina el sentido de la elegancia estructural y permite apreciar la belleza formal de las Matemáticas. El científico o ingeniero que desconoce el contexto histórico de sus desarrollos o diseños, o las implicaciones socio-económicas de sus decisiones técnicas, trabaja con una visión incompleta.

La universidad debe fomentar no solo competencia técnica, sino también la capacidad de cooperación y de comunicación, el interés por otras disciplinas y metodologías, la paciencia ante ritmos distintos y formas de razonar y argumentar y, finalmente, un saber amplio y sin fronteras.

III.1.1. Un ejemplo de investigación transdisciplinar. Modelado de la homeostasis y la epigenética desde una perspectiva de mecánica de sólidos deformables

Como he comentado, mi vida ha transcurrido en las fronteras entre distintas disciplinas, desde la ingeniería mecánica y civil, a la energía y la biología. Sin embargo, en todos los casos, mi mayor interés se ha centrado en el modelado matemático de sistemas dinámicos, así como en las herramientas matemáticas necesarias para su formulación y resolución. *Suelo definirme como un matemático aficionado, pero con mentalidad ingenieril al tener*

siempre presente la solución de problemas reales, teniendo en cuenta los datos y recursos disponibles.

Desde la perspectiva integradora de las matemáticas, problemas muy diferentes pueden verse bajo un mismo prisma, o mejor una formulación similar. No es de extrañar, por tanto, que una gran parte de mi trabajo se haya centrado en la identificación de similitudes entre fenómenos de ámbitos muy separados. Así ocurrió ya en el primer caso que abordamos sobre la adaptación del tejido óseo. Aprovechando nuestro conocimiento previo sobre la teoría del daño de materiales estructurales, establecimos una formulación completa de la remodelación ósea anisótropa, con resultados bien fundamentados teóricamente, y con una alta capacidad predictiva [76].

Desde entonces, hemos seguido un esquema similar para entender otros problemas de interés biomédico. En los últimos años, hemos aplicado los principios de la teoría de control y de las variables de estado, así como su analogía con la mecánica del continuo, para predecir distintos procesos de adaptación de tejidos y células y también su ruptura, como ocurre en procesos cancerígenos. En lo que resta de este apartado, trataré de describir de forma muy sucinta algunos de estos casos, haciendo abstracción de la matemática y conceptos más especializados.

La notable resistencia de la vida a entornos diversos y agresivos, incluyendo niveles extremos de pH, concentraciones muy bajas de oxígeno, disponibilidad limitada de nutrientes o temperaturas extremas, pone de manifiesto la impresionante capacidad de los sistemas biológicos, desarrollada a lo largo de miles de millones de años de evolución, para mantener su estabilidad interna [77]. Para ello se utilizan varias estrategias de adaptación, que operan a través de múltiples escalas temporales [78], desde la respuesta inmunitaria inmediata [79], hasta ajustes evolutivos a

largo plazo que configuran las características de las especies [80]. Entre ambos extremos se encuentran otros procesos adaptativos cruciales, como la homeostasis [81] y la adaptación epigenética [82]. Todos ellos actúan de manera conjunta para asegurar la supervivencia individual y de la especie. Comprender estos mecanismos es, por tanto, fundamental para la biología.

Para sobrevivir y reproducirse, los organismos vivos deben ser robustos, tolerar daños, e incorporar mecanismos de reparación, de modo que su funcionamiento fisiológico no se vea comprometido por variaciones, incluso sustanciales, en las condiciones externas. La homeostasis se define como el conjunto de procesos fisiológicos que estabilizan activamente el entorno interno de un organismo (por ejemplo, la temperatura, la glucosa en sangre, las concentraciones hormonales, etc.). Desde las ideas originales de Bernard y su desarrollo posterior por Cannon [82], el concepto de homeostasis se ha convertido en el marco teórico central de la fisiología.

Los procesos homeostáticos son el resultado de una compleja interacción entre redes de órganos, orquestada por el cerebro y el sistema inmunitario. La termorregulación en mamíferos, por ejemplo, es un proceso notable de homeostasis, cuyos principios operativos y componentes estructurales presentan claras similitudes con los sistemas de control por retroalimentación diseñados en ingeniería [83].

El cuerpo humano, por ejemplo, posee un sistema térmico capaz de mantener su temperatura interna dentro de un pequeño rango de variación alrededor de 37 grados Celsius. Los termorreceptores periféricos situados en la piel y en otros tejidos detectan cambios en la temperatura externa, fruto de las perturbaciones ambientales. Esta información actúa como una señal de retroalimentación que se compara con la temperatura corporal central. Para medir con precisión esta última, los mamíferos disponen de termorreceptores internos localizados principalmente en el hipotálamo,

que calculan directamente la temperatura de la sangre que circula por el cerebro, proporcionando una medida instantánea del valor de la temperatura central.

El hipotálamo, en particular su región preóptica anterior, actúa como el controlador central. Recibe información de los termorreceptores periféricos y de los centrales, compara la temperatura corporal con el valor de referencia y determina el tipo y la magnitud de la respuesta de los actuadores. A continuación, envía señales a través del sistema nervioso hacia los diferentes efectores encargados de modificar la temperatura corporal.

Estos efectores incluyen diversos mecanismos fisiológicos. Para aumentar la producción de calor y conservarlo en condiciones de baja temperatura exterior, se activan la contracción muscular involuntaria (temblor), aumenta la tasa metabólica —especialmente en el tejido adiposo marrón—, y se produce vasoconstricción periférica, que reduce la pérdida de calor externo, así como la piloerección, que crea una capa aislante de aire. Por el contrario, en condiciones de calor, se activa la vasodilatación periférica y la sudoración, que enfrían la superficie de la piel mediante evaporación. A estos mecanismos fisiológicos se suman cambios de comportamiento como la búsqueda de refugio, cambios en la actividad y la vestimenta.

El remodelado óseo constituye otro ejemplo paradigmático de proceso homeostático, en el que la masa y la arquitectura del hueso se regulan de manera continua en respuesta a estímulos mecánicos y a la acumulación de microdaño [84]. Este proceso implica la acción coordinada de diferentes tipos celulares, principalmente los osteoclastos, responsables de la resorción ósea, y los osteoblastos, encargados de la formación de nuevo tejido óseo, así como los osteocitos, que actúan de sensores del entorno mecánico y transmiten esta información a los anteriores.

En condiciones normales, el hueso mantiene un equilibrio dinámico entre estos dos procesos, de modo que la cantidad total de tejido se conserva dentro de un rango adecuado, para garantizar la resistencia mecánica y la funcionalidad. Cuando el tejido óseo experimenta niveles de carga superiores a los habituales, se activa la formación de nuevo hueso, aumentando su densidad y resistencia. Por el contrario, cuando las cargas disminuyen, se favorece la resorción, reduciendo la masa ósea. Este equilibrio puede interpretarse también como el resultado de un sistema de control homeostático, en el que la variable controlada, la densidad o la porosidad del tejido óseo, se adaptan al entorno mecánico que soporta el hueso en cada momento [85].

Ambos casos son ejemplos de sistemas que *funcionan como sistemas de control*, con bucles de retroalimentación negativa finamente ajustados, que involucran sensores, centros de control y efectores, de forma análoga a sus equivalentes artificiales [86]. Además, *presentan características clave de los sistemas de control robusto*, como la utilización de múltiples tipos de efectores redundantes, de modo que, si uno de los mecanismos resulta insuficiente o está comprometido, otros pueden compensarlo [87]. En segundo lugar, suelen integrar múltiples señales y coordinar múltiples respuestas en procesos de decisión complejos, que van más allá de un simple control binario. También, las respuestas biológicas suelen ser graduales y moduladas en intensidad, en lugar de activarse de forma abrupta, lo que contribuye a la estabilidad del sistema. Finalmente, los sistemas biológicos presentan una notable tolerancia a incertidumbres y perturbaciones, manteniendo su funcionamiento dentro de rangos aceptables incluso en condiciones adversas.

Los procesos homeostáticos descritos anteriormente suponen la existencia de un valor de referencia fijo, frente al cual se comparan las variables controladas. Sin embargo, en muchos sistemas biológicos esta hipótesis

resulta insuficiente para explicar el comportamiento observado a largo plazo. Los organismos no solo mantienen sus variables internas dentro de ciertos rangos, sino que son capaces de adaptar dichos rangos cuando las condiciones ambientales cambian de forma persistente, como ocurre en cambios de temperatura estacionales, o en entornos de microgravedad, o después de largas enfermedades. Esta capacidad de adaptación se asocia, en gran medida, a los mecanismos epigenéticos. en situaciones en las que las condiciones externas se mantienen durante periodos largos.

La epigenética se refiere al conjunto de mecanismos moleculares que regulan la actividad génica sin alterar la secuencia subyacente del ADN. Estos mecanismos incluyen la metilación del ADN, las modificaciones postraduccionales de histonas, el remodelado de la cromatina y la reorganización espacial del genoma dentro del núcleo. En conjunto, determinan cómo se transcribe la información genética, configurando la identidad celular, el compromiso de linaje, y la capacidad de las células para responder a estímulos ambientales [88].

La estabilidad y reversibilidad de las marcas epigenéticas permiten a las células integrar señales de su microentorno y almacenar información sobre exposiciones pasadas, dotando a los tejidos de una forma de memoria molecular. Esta memoria, sin embargo, no es perfecta ni permanente, ya que los cambios epigenéticos pueden revertirse con el tiempo, pero proporciona una capacidad adaptativa esencial para la supervivencia en entornos cambiantes [89].

Desde el punto de vista del modelado, *estos procesos se suelen formular dentro de la teoría de control*. Ello permite trasladar al ámbito biológico herramientas matemáticas y numéricas ampliamente desarrolladas. Estos conceptos encuentran una *interpretación natural* en varios campos de la *termodinámica con variables de estado* [90], y, en particular, en la viscoplasticidad [91], o la

mecánica del daño continuo [92]. Por ejemplo, son fácilmente identificables la región de homeostasis con la equivalente elástica en el espacio de estímulos externos, la recuperación del estado homeostático con cambios en la deformación plástica o el daño, y la evolución de aquellos con la ley de flujo de las variables internas. Ello permite, por ejemplo, la utilización directa de los algoritmos manejados en la mecánica no lineal para resolver problemas biológicos complejos, así como resultados termodinámicos para una mejor interpretación de los procesos metabólicos subyacentes.

En este contexto, la epigenética puede interpretarse como un mecanismo que modifica los parámetros del sistema de control, permitiendo que el sistema se readapte a nuevas condiciones. Por ejemplo, en la remodelación ósea, dada una situación de ausencia prolongada de carga mecánica, como ocurre en periodos largos de inmovilización, el sistema reduce el nivel de densidad considerado óptimo, lo que conduce a una disminución de la masa ósea. Este proceso no puede explicarse únicamente mediante la homeostasis clásica, sino que requiere la incorporación de un nivel adicional de regulación.

La epigenética puede interpretarse entonces como un metacontrol que actúa sobre el propio sistema de control, ajustando los parámetros del regulador y, en particular, la región de referencia dentro de la cual el sistema considera que el funcionamiento es adecuado. Este metacontrol opera sobre escalas temporales más largas que las asociadas a la homeostasis. Como consecuencia, el sistema no responde únicamente al estado instantáneo de los estímulos externos, sino también a su historia.

Desde el punto de vista metodológico, este enfoque fenomenológico basado en relaciones entrada–salida permite evitar la necesidad de describir en detalle todos los mecanismos moleculares subyacentes, lo que resultaría

inabordable en muchos casos. En su lugar, se capturan las características esenciales del comportamiento del sistema, mediante variables de estado y leyes de evolución que pueden identificarse a partir de observaciones experimentales. Esta estrategia facilita la construcción de modelos manejables y potencialmente predictivos.

Referente a su equivalente mecánico, la epigenética modifica el dominio elástico, siendo equivalente a las variables de endurecimiento plástico o a cambios en el criterio de daño. Un elemento para destacar es que los procesos mecánicos en materiales inertes no son reparables habitualmente (salvo algunos casos específicos, como ocurre en los materiales autorreparables), mientras que los procesos homeostáticos o epigenéticos sí lo son, siendo necesario modificar las teorías mecánicas clásicas de materiales inertes para incluir esta posibilidad [93].

Otro ejemplo ilustrativo de este tipo de comportamiento se encuentra en la adquisición de resistencia a fármacos en células tumorales, como ocurre en las de glioblastoma tratadas con Temozolomida. Las células expuestas de forma prolongada al fármaco desarrollan cambios epigenéticos que modifican su respuesta, reduciendo progresivamente la eficacia del tratamiento. Este proceso no puede explicarse únicamente mediante mecanismos homeostáticos, sino que requiere la consideración de cambios epigenéticos.

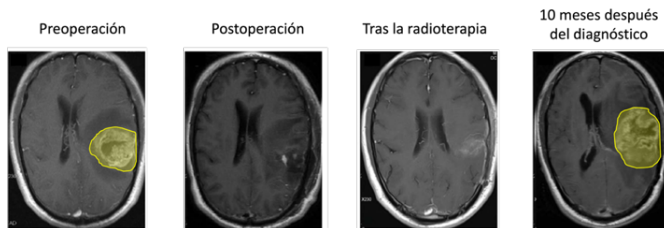


Figura 20. *Recidiva de un glioblastoma multiforme.*

El glioblastoma (GBM) es una de las enfermedades más difíciles de tratar en oncología [94]. A pesar de su baja prevalencia (incidencia de 3 casos por cada 100 000 personas-año [95]), es el tumor maligno primario del sistema nervioso central más común, representando el 48,6% del total [96]. También es el tumor cerebral más letal, con una tasa de supervivencia a cinco años del 6,8% [97] y una media de aproximadamente catorce meses tras el diagnóstico en pacientes que han recibido el tratamiento estándar actual [98, 99].

El tratamiento actual es el denominado protocolo de Stupp [100], que consiste en la resección quirúrgica máxima segura, seguida de radioterapia con quimioterapia concomitante y adyuvante con temozolomida (TMZ), el único fármaco aprobado para este protocolo. El esquema de tratamiento, según este protocolo, consta de seis ciclos de 28 días, en cada uno de los cuales se administra TMZ durante los primeros cinco días a una dosis diaria de 150-200 mg/m² (miligramos por metro cuadrado de superficie corporal). Sin embargo, este tratamiento solo aumenta la mediana de supervivencia global de 12,1 a 14,3 meses [101]. Desde su aprobación en 2005, y a pesar de los considerables esfuerzos realizados, no se han producido avances significativos en el tratamiento ni en la tasa de supervivencia de este tumor [101].

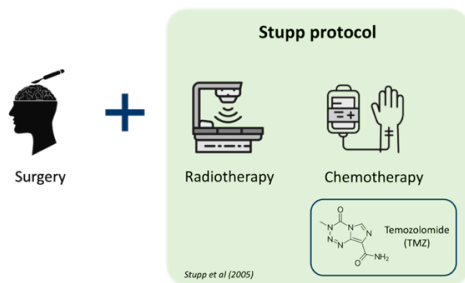


Figura 21. Protocolo de Stupp para tratamiento del glioblastoma.

La TMZ es un agente alquilante oral que actúa sobre las células del glioblastoma multiforme (GBM) induciendo cambios epigenéticos [102] que conducen a plasticidad fenotípica [103]. Ambos elementos se incluyeron en 2022 entre los marcadores característicos del cáncer [104]. En particular, el mecanismo de acción de la TMZ consiste en inducir la metilación en varias bases del ADN. Afecta a las células proliferantes, induciendo la detención del ciclo de proliferación celular y, por lo tanto, impidiendo su duplicación (es decir, causando un efecto citostático), lo que finalmente conduce a la apoptosis [105,106]. Sin embargo, más del 50 % de los pacientes con glioblastoma multiforme (GBM) no responden al tratamiento con TMZ [98], debido a la resistencia intrínseca y la adquirida por las células de GBM a la quimioterapia. De hecho, estas células son capaces de revertir los cambios epigenéticos inducidos por la TMZ y recuperar su comportamiento proliferativo normal [107]. La resistencia inducida se asocia principalmente a una sobreexpresión de la proteína O6-metilguanina-ADN metiltransferasa (MGMT), que puede reparar el daño al ADN inducido por TMZ, eliminando los grupos metilo unidos al ADN [108]. Existen otros mecanismos de resistencia adquirida, como la aparición de poblaciones de células madre cancerosas [109].

Para superar el estancamiento en el desarrollo de nuevos tratamientos para este tumor, resulta fundamental comprender mejor los mecanismos que desencadenan la quimiorresistencia. Los modelos de cultivo tridimensionales son las herramientas *in vitro* más adecuadas para reproducir el comportamiento tumoral y la respuesta a los fármacos, ya que permiten imitar fielmente las condiciones fisiológicas *in vivo*, tanto estructurales como funcionales. Entre ellas, los esferoides son la técnica más utilizada [110], debido a su facilidad de cultivo y a su capacidad para reproducir las interacciones célula-célula y los gradientes presentes en los tumores sólidos [111]. En nuestro trabajo, nos centramos en los resultados

obtenidos por nuestro grupo en un estudio previo, donde se trataron esferoides de la línea celular comercial de glioblastoma U87 con TMZ siguiendo el esquema clínico. Se observaron dos respuestas diferentes. Mientras que un grupo de esferoides tratados mostró un estancamiento en su crecimiento que se mantuvo durante todo el experimento, otro desarrolló resistencia y pudo reanudar su crecimiento, a pesar de la administración posterior de TMZ.

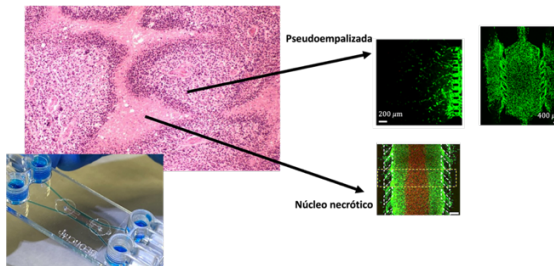


Figura 22. *Modelo de formación de pseudoempalizadas y núcleo necrótico de glioblastoma in vitro.*

El objetivo principal de nuestro trabajo fue el desarrollo de un modelo matemático que incorporase la adquisición de resistencia en el glioblastoma, para reproducir cuantitativamente los resultados experimentales mencionados. El modelo considera la adaptación celular inducida por la temozolomida y su efecto citostático, así como la eventual reparación de estos cambios que conduce al desarrollo de resistencia. En otro trabajo anterior de nuestro grupo, se propuso un marco general para modelar la adaptación celular, incluyendo el fenotipo celular definido por un conjunto de variables internas que describen el estado celular [112]. Siguiendo conceptos de la teoría de control, y una formulación bien conocida en mecánica del continuo, se derivó una ecuación de evolución para cada variable interna, y se modela su efecto sobre el comportamiento celular derivado de los cambios en los valores de dichas variables internas,

lo que permite el acoplamiento con el microambiente y la evolución celular.

Este modelo se particularizó al problema de la adaptación de células de glioblastoma en forma de esferoide a la temozolomida, y calibramos sus parámetros para que coincidan con los datos experimentales. Una vez validado, analizamos el modelo en relación con cuestiones biológicas, como la causa de las diferencias entre las dos poblaciones de esferoides (las que desarrollan resistencia y las que no).

Curiosamente, en los experimentos numéricos observamos que el segundo ciclo de tratamiento no tiene efecto sobre el comportamiento celular, lo que sugiere que las mismas células tratadas con un solo ciclo de temozolamida entre los días 0 y 5 deberían presentar una evolución similar a las tratadas con dos ciclos. Este hecho se probó experimentalmente, sometiendo esferoides de glioblastoma a un solo ciclo de temozolamida y dejándolos reposar hasta el día 56.

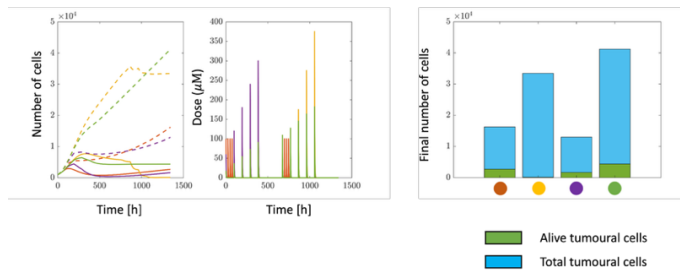


Figura 23. Evolución del tamaño de esferoides y células tumorales tras varios ciclos de tratamiento.

Estos resultados preliminares ejemplifican la utilidad de los modelos matemáticos, como el aquí presentado, para proponer nuevas hipótesis e identificar los mecanismos o variables clave en un proceso complejo como la adquisición de quimiorresistencia. Además, muestra cómo los modelos

ayudan a reducir el número de experimentos necesarios en el laboratorio, disminuyendo los costes asociados y señalando los experimentos que podrían generar mayor conocimiento. Por supuesto, se requiere una validación adicional para comprobar si el modelo es capaz de generalizar y predecir correctamente la evolución de los esferoides en diferentes esquemas de tratamiento. Finalmente, un modelo completamente validado podría funcionar como un gemelo digital de los esferoides y utilizarse para determinar cuál sería el tratamiento óptimo para lograr la remisión tumoral en pacientes reales.

Las primeras pruebas realizadas concuerdan con hallazgos previos en ensayos clínicos, que sugieren que los regímenes prolongados o de alta densidad de dosis no mejoran la supervivencia [113] (en nuestro caso, el esferoide creció de forma similar al tratamiento clínico). Como resultado principal, se sugiere que los esquemas con dosis variables y crecientes a lo largo de los ciclos podrían ser beneficiosos, ya que el tumor no tiene la oportunidad de adaptarse a dosis altas en los primeros ciclos. Aunque las conclusiones deben validarse siempre con datos experimentales, los resultados obtenidos permiten acotar las posibles soluciones, reducir los necesarios, pero costosos, ensayos clínicos, e identificar causas posibles para los resultados obtenidos, demostrando una vez más el valor de la investigación transdisciplinar.

III.2. El papel del azar. Mi vida en una cáscara de nuez

"Success = talent + luck. Great success = a little more talent + a lot of luck."

Daniel Kahneman

En este punto trataré de hacer ver cómo una vida no está predeterminada por los condicionantes particulares del lugar y hogar de nacimiento, y la educación familiar, aunque, sin duda alguna, influyen decisivamente.

Mostraré con mi propio ejemplo cómo circunstancias particulares, decisiones aparentemente intrascendentes, o personas y ejemplos en un momento particular, son tan, o más importantes que el esfuerzo o el talento.

No pretendo dar ningún ejemplo, ni centrarme en lo que he hecho, sino más bien en por qué lo hice, razones que son, muchas más veces de lo imaginado, fruto del azar, o de la feliz coincidencia de momento, espacio y circunstancias, y no de la reflexión o de la toma pausada de decisiones. Ello no inhabilita la constancia y la preparación. Muy al contrario, las valora aún más, ya que hay que estar preparado para que, cuando lleguen esos momentos, puedas optar por la mejor opción, y, por supuesto, para que quienes toman las decisiones piensen en ti como potencial beneficiario. Como tantas veces le he repetido a mi hijo, *tienes que abrir el mayor número de puertas posibles para que, en algunas, te inviten a pasar.*

Sin embargo, este reconocimiento del papel del azar, fuera por tanto de nuestro control, sí relativiza los méritos personales. Hay muchos con los mismos o más que nosotros, que no se encuentran en el momento de abrir la puerta, o bien la persona que la abre no los considera por múltiples razones, o simplemente, no tuvieron al lado a aquellos que les impidieron volver atrás en momentos de duda, o que les dieron la mano, ya dentro, para profundizar y continuar abriendo otras. Como corolarios inmediatos aparecen la obligación de devolver los favores a los que hoy se encuentran en la misma situación en la que tú te encuentras, y el reconocimiento de que las razones de que la mayoría no llegue al final del camino no son la pereza, la falta de motivación o la voluntad, sino que no tuvo la fortuna que otros sí tuvimos.

En mi caso, he contado con apoyos en todos los momentos de mi vida y para todas las circunstancias, por lo que debo estar agradecido. Nací en

Córdoba en 1956, en una familia normal de aquel tiempo, padre en la administración del estado y madre ama de casa, a pesar de que, como ocurre tantas veces, disponía de una inteligencia y constancia mayor que el resto de la familia. Esto lo demostró cuando tuvo que ponerse a trabajar tardíamente para criar a sus cuatro hijos, tras la muerte prematura de mi padre a los 34 años (yo, el mayor de los hermanos, contaba con 7). Los padres de entonces, y mi madre no era una excepción, tenían claro que la educación era el camino para progresar, por lo que, con la ayuda de todos, incluido el Estado, hizo oídos sordos a nuestra situación económica y nos dio la oportunidad de estudiar, en mi caso, incluso fuera de mi ciudad natal.



Figura 24. *Instituto de Bachillerato Lucio Anneo Séneca (Córdoba).*

Tuve la fortuna, tanto en el colegio público como en el instituto, de contar con unos profesores excelentes, que me despertaron el gusto por aprender y la fascinación por las matemáticas.

Mi sueño era estudiar Ingeniería de Telecomunicaciones. Desafortunada, o quizás afortunadamente como luego veremos, la economía familiar no me permitió el traslado al único lugar donde entonces se impartía, Madrid, por lo que la solución fue estudiar en Sevilla la carrera de Ingeniería Industrial, en su rama eléctrica. Tras tres años persiguiendo este deseo,

cuando llegó el momento de elegir especialidad, un compañero del piso de estudiante donde me alojaba me sugirió matricularme también de Mecánica con el pretexto de acompañarlo, ya que él no tenía tan claro su futuro como lo tenía yo. Cuando, tras negarme repetidamente, insistió con el argumento de que la podía abandonar cuando quisiese, y que, además, no me suponía costo al disponer de beca y matrícula gratuita, siguiendo a mi peor defecto, el no saber decir que no, acepté finalmente, y me matriculé de ambas especialidades, eléctrica y mecánica, con la clara intención de asistir a alguna clase de la segunda para dejarla prontamente. ¿Quién podría prever entonces que esta decisión sin importancia cambiaría mi vida?



Figura 25. *Escuela de Ingenieros Industriales en Sevilla en 1975.*

Asistí con pocas ganas a la primera clase de Mecánica (Resistencia de Materiales II), que impartía un profesor joven, recién llegado de Madrid. Se llamaba Enrique Alarcón, y nos comentó que explicaría Teoría de Elasticidad y que, para eso, era conveniente saber algo de tensores, lanzándose a explicarnos qué eran estos tensores (que nunca habíamos visto antes) y cómo se operaba con ellos. Tengo que confesar que no entendí casi nada, pero quedé fascinado. Por mi primera vez, un profesor me demostraba que las matemáticas complejas podían tener aplicación. Además, su forma de explicar, su convencimiento, su carisma, y la ilusión

de los estudiantes recién terminados que lo acompañaban hicieron el resto. Seguí esa asignatura hasta el final de curso, e intenté, por primera vez en toda la carrera, aprenderla y no solo aprobarla. Compré libros fuera de programa, me afané por entender, y pronto me acerqué a su cátedra para solicitar trabajar en ella en cualquier tema y con quien fuese. Aunque terminé las dos especialidades, ya no hubo vuelta atrás.



Figura 26. *Enrique Alarcón y su esposa Pilar en Sevilla en 1976.*

Al año siguiente, Enrique nos dejó huérfanos a muchos, trasladándose con algunos de sus discípulos a la cátedra de Estructuras de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid. En realidad, eso lo supe luego, pues bastante ocupado estaba yo realizando las milicias y las decenas de exámenes a los que tuve que enfrentarme para finalizar mis estudios.

Recién terminados éstos, recibí una llamada de uno de los discípulos de Enrique, que había quedado en Sevilla a cargo de la cátedra, Rafael Picón, quién, a la sazón, había dirigido mi trabajo en ella. Rafael me propuso ocupar una plaza de ayudante de clases prácticas de Resistencia de

Materiales, que acepté sin muchas dudas. En octubre de 1978 comencé mi vida académica.



Figura 27. *Rafael Picón en 1980.*

Tras un año peleándome con la asignatura, surgió una nueva oportunidad cuando Rafael me invitó a acompañarle a recibir unos cursos en Madrid, impartidos por Enrique y sus colaboradores, sobre Cálculo Matricial y Análisis Dinámico de Estructuras. Allí nos fuimos, en su destartalado coche, en un viaje de casi ocho horas. Volví a retomar el contacto con Antonio Martín y Federico París, hoy presentes, y José Domínguez, desgraciadamente fallecido hace poco más de un año. Tras finalizar los cursos, y ya en el coche, saliendo del aparcamiento de la Escuela de Madrid, Enrique me comentó que Rafael, siempre generoso, al preferir perder a su único colaborador para abrirle puertas a un futuro mejor, le había trasladado mi interés por ir con él a Madrid. Balbuceando le respondí que era cierto, a lo que me contestó “ya hablaremos”.

En septiembre de 1979 comencé en la Escuela de Madrid mi periodo de formación más fructífero. Larguísimas jornadas preparando clases, problemas y evaluaciones de asignaturas que ni siquiera me habían enseñado, realizando proyectos para empresas, y aprendiendo el arte de la

investigación con el principio de mi tesis doctoral. Pero, además, teníamos tiempo para asistir a seminarios y congresos, para disfrutar de la vida de unos jóvenes con ganas de comerse el mundo. En junio de 1980, me casé con mi novia de siempre, Conchi, y nos fuimos, junto a mi compañero y amigo Francisco García Benítez, al departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Southampton, con el grupo más fuerte del mundo en Elementos de Contorno, dirigido por el profesor Carlos Brebbia, para progresar en el tema de mi tesis. Otros dos meses frenéticos, donde mi reciente esposa y yo nos veíamos por las noches, y algún fin de semana que dedicamos a visitar algunos lugares de interés. Sin embargo, no solo volví con la tesis más que mediada en forma de tarjetas perforadas en una mochila, sino que experimenté por primera vez el vértigo de estar en otro grupo internacional, otro idioma, y establecer nuevos contactos.

Retornamos a Madrid, y tras pocos meses, Enrique me dijo que tenía que presentar la tesis doctoral “ya”, porque quería que firmase a una plaza de profesor adjunto (hoy titular). Le respondí que no es posible, ni siquiera trabajando 24/7. “Entonces, cambiaremos el tema de tesis”, me contestó. Imaginad esta situación hoy día y convendremos que mi respuesta positiva solo pudo venir de la confianza absoluta que tenía en mi mentor. “Si crees que yo puedo hacerlo, comienzo mañana mismo”, le contesté. Efectivamente, en mayo de 1981 entregué la tesis, tras dos días sin dormir, y con la ayuda inestimable de todos mis compañeros, y de mi esposa, que se encargó de escribir a máquina las más de 400 páginas de las que constaba.



Figura 28. *Miembros del grupo de Enrique Alarcón en Madrid en 1981.*

Firmé en plazo la plaza reseñada, y sin casi tiempo para respirar, Enrique y uno de los miembros del tribunal de mi tesis, el profesor Alberto Dou, figura insigne de la matemática española, me propusieron ir de postdoc a un centro de matemáticas. De nuevo, sin pensar mucho, acepté, y tras conseguir una beca Fulbright, me aceptaron en el Courant Institute de la Universidad de Nueva York, meca entonces de la matemática mundial con varias medallas Fields entre sus filas. En septiembre de 1981, Conchi y yo nos trasladamos a Nueva York. Otra experiencia formidable, no solo por la ciudad y los amigos que hicimos, sino porque, por primera vez, conocí la investigación de excelencia. Un aprendizaje muy duro, al estar tan lejos de mis conocimientos de ingeniería, pero fundamental para mi futuro. En ese mismo periodo, y en un viaje relámpago a España, conseguí la plaza de profesor adjunto en Madrid, donde volvimos al curso siguiente.



Figura 29. *Courant Institute of Mathematical Sciences. New York University,*

Poco cambió mi vida en los dos años siguientes, salvo alguna responsabilidad adicional, y la consecución de la cátedra de Teoría de Estructuras de la Escuela de Ingenieros Industriales de Zaragoza en 1983. Antes de pasar a esta etapa, tengo que resaltar que, hasta ese momento, pocas decisiones tuve que tomar, tan solo seguir los consejos y directrices de mi mentor, con el convencimiento absoluto de que significaban la mejor opción para mi futuro. En ese momento, Enrique me ofreció seguir en Madrid, con la promesa de que conseguiría una cátedra en breve, presentándoseme una disyuntiva en la que seguir en Madrid era la opción más segura. A su sombra, en el lugar y con asignaturas que ya conocía, con contratos con empresas, laboratorios y medios, en nuestro apartamento, y con nuestros amigos, y un futuro lleno de opciones en la escuela más demandada en España. La alternativa era comenzar una etapa en solitario, con pocas referencias, una escuela nueva, sin edificio, ni laboratorios, ni ordenadores, ni colaboradores, en una ciudad desconocida, pero libre para elegir y equivocarme. Me decidí por esta última opción, y no erré, no solo por mi crecimiento personal, sino, aún más importante, porque me ayudó a mantener, hasta el final y sin ningún roce, algo para mí decisivo, la relación paterno-filial con Enrique.

En junio de 1984, Conchi embarazada y yo nos trasladamos a Zaragoza con la idea clara de, tras unos años, volver a Madrid o Sevilla, con la experiencia necesaria. Los principios fueron duros, sin recurso alguno, tratando de abrirme camino, con horas eternas trabajando con mi primer estudiante, Luis Gracia, y con el nacimiento de nuestro hijo, Alberto. Sin embargo, en la muy joven escuela de Zaragoza encontré un ambiente lleno de compañeros jóvenes, muchos de ellos, como yo, procedentes de otras ciudades y con estancias en el extranjero. Además, parecía que nos hubiésemos juramentado para conseguir convertir la escuela en una de las mejores de España. Todos ellos, la mayoría ya jubilados, y algunos fallecidos, han sido parte de mi familia, no solo por proximidad intelectual y humana, sino porque pasé con ellos más horas que con mi esposa e hijo. José Manuel Correas, Felipe Pétriz, Francisco Serón, Rafael Navarro, Rafael Bilbao, Jesús Arauzo, Javier Castany, Antonio Valero, César Dopazo, Manuel Silva, y muchos más de la primera hornada, junto al calor y apoyo de nuestros muchos amigos fuera de la Escuela, nos convencieron para hacer nuestra vida aquí.



Figura 30. Edificios interfacultades y Torres Quevedo. Primeros edificios de la ETSII de Zaragoza,

Resulta evidente que no puedo detenerme en todo lo que ha ocurrido en estos más de cuarenta años. Solo señalaré algunos puntos que, al margen de ser hitos en mi vida, ilustran lo que creo que ha de ser parte del sentir

universitario. En 1985, tras la implantación de la Ley de Reforma Universitaria en España, se crean por primera vez los departamentos como agrupaciones de áreas de conocimiento. Su configuración fue un proceso convulso, en el que, en demasiadas ocasiones, se antepusieron filias y fobias personales a requisitos científicos. Desde el principio, tuve la convicción de que mi departamento debía tener un nombre y dimensión reconocible internacionalmente. Así, se configuró el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza, del que fui nombrado primer director. Esta decisión permitió posteriormente que nuestra universidad fuese elegida para participar en la fase piloto ECTS del recién creado programa Erasmus, en una de las cinco titulaciones que configuraban tal programa piloto, precisamente la de ingeniería mecánica. Ello me permitió, como coordinador científico, participar en las primeras decisiones, y que nuestra universidad fuese, durante muchos años, la española que más estudiantes de ingeniería envió y recibió en Europa.

En 1990, tras mi paso por la subdirección y la dirección del departamento de Ingeniería Mecánica, mi compromiso era aceptar la dirección del Centro Politécnico Superior, un puesto que se decidía entonces casi por cooptación. Sin embargo, tras seis años siguiendo con la línea de investigación que había heredado de Madrid, estaba ansioso por encontrar una propia y de mayor futuro. Así pues, le comenté a mi buen amigo Manuel Silva, fallecido también recientemente, que no podía sucederle como director, como estaba pactado, porque había conseguido un año sabático para ir a Estados Unidos. Me contestó que se alegraba por mí, pero que se volvería a presentar a la dirección para que, tras finalizar su segundo mandato, cumpliera con mi obligación, algo que hice.

La estancia de la familia al completo en la Universidad de Stanford fue extraordinaria. Nuevos amigos, nuevos lugares, y un ambiente estimulante. Por mi parte, un regreso a la mejor investigación mundial, encontrarme de

nuevo con mis inseguridades y mis limitaciones, pero al mismo tiempo disfrutar del aprendizaje, no solo científico, sino humano. Tuve de nuevo la fortuna de trabajar con Juan Carlos Simó, español de origen pero afincado definitivamente en EEUU, y que es considerado una de las figuras mundiales de siempre en Mecánica Computacional. De Juan Carlos, tristemente fallecido a los 42 años en plenitud de sus facultades humanas y científicas, aprendí la profundidad en el análisis matemático y la relación de éste con la física subyacente. Mi posterior andadura por la mecánica de sólidos no lineal se debe en gran medida a sus enseñanzas.

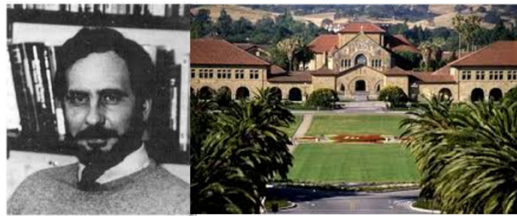


Figura 31. *Juan Carlos Simó y la Universidad de Stanford en 1990.*

Esta estancia en Stanford me permitió abandonar progresivamente mi trabajo en elementos de contorno y pasar a la Mecánica de Medios Continuos no lineal, abriendo la puerta a nuevas aplicaciones. La más importante, sin duda, fue la Biomecánica, y posteriormente la Mecanobiología y la Ingeniería de Tejidos y Celular, que de nuevo abordé, no como una decisión reflexionada, sino fruto del azar. En 1998, poco después de abandonar la dirección de la Escuela, recibí la visita de un colega, hoy amigo, de la Facultad de Medicina, en concreto del Departamento de Traumatología, el doctor Daniel Palanca. Tras presentarme, me trasladó que le habían hablado de mí como experto en Elementos Finitos, y que le interesaría saber si era posible realizar por mi parte un estudio comparativo entre distintas fijaciones de fracturas de

pelvis. Tras algunas preguntas, y fruto de mi ignorancia y ganas de ayudar, le respondí que sí. Comenzamos con un proyecto fin de carrera sobre el tema, donde inmediatamente me di cuenta de que el problema no estaba en las fracturas o las fijaciones de acero que sabía modelar, sino en el comportamiento del tejido óseo. Tras estudiar un poco, le propuse a un estudiante de doctorado, José Manuel García, cambiar su tesis doctoral recién comenzada sobre plasticidad, al modelado de la remodelación ósea, partiendo de la hipótesis de que la predicción de la evolución de la porosidad del hueso puede realizarse siguiendo los principios de la Mecánica del Daño Continuo. Ese fue el principio de una reconfiguración completa de mi grupo de investigación en los años siguientes, que llegó a ser en uno de los más potentes de nuestro país en Tecnologías Biomédicas. De nuevo la suerte bien aprovechada.

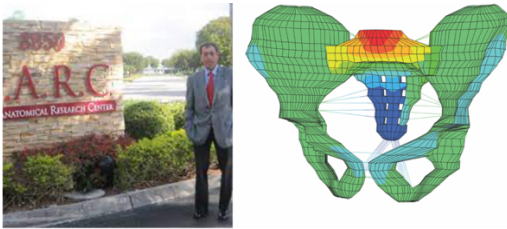


Figura 32. Daniel Palanca y nuestros primeros resultados sobre fijaciones de pelvis en 1998,

El periodo 1991-1997 en la Escuela de Ingenieros Industriales de Zaragoza fue frenético. Se triplicó el número de estudiantes, rompiendo las costuras de edificios y recursos, se pasó de una titulación a cuatro, hubo cambios de planes de estudios y de nombre, pasando a ser el Centro Politécnico Superior (CPS). Obras en los pasillos, tres turnos de clase de 8 de la mañana a 10 de la noche, entrada masiva de profesores jóvenes. En definitiva, un periodo convulso, pero apasionante, que puso a prueba nuestra resiliencia y cohesión. Afortunadamente, la construcción y puesta

en marcha de un nuevo edificio, y el transcurso natural hicieron que, en el año 1999, el CPS estuviese razonablemente consolidado.

Sobre esa fecha, en las múltiples charlas durante las comidas con mis amigos y compañeros de la Escuela, se deslizó la idea de que no avanzar es retroceder, que las infraestructuras y la dimensión docente estaban apuntaladas, por lo que, si queríamos mantener la unión y la ilusión, deberíamos plantear iniciativas ambiciosas en otros ámbitos. Tras defender la necesidad de coordinar y estructurar la investigación en la Escuela (de nuevo mi obsesión por unir para conseguir objetivos mayores), se me encomendó la creación de un instituto de investigación. Tras informarme, vi que la idea no era nueva en nuestra universidad, pero que la convicción, muy extendida, de que los institutos eran iniciativas unipersonales, próximas al chiringuito caciquil, había impedido el avance de esas otras propuestas. Armado con el apoyo de toda la Escuela, me sentí con la fuerza de defender la negación obvia de ese hecho, en nuestro caso. Tras presentar la idea a sindicatos, organizaciones empresariales, grupos universitarios, y demás miembros del Consejo Social, y con el apoyo inestimable del rector de entonces, Felipe Pétriz, se aprobó finalmente la creación del primer instituto universitario de la Universidad de Zaragoza, el Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), del que fui primer director, y al que siguieron, afortunadamente, muchos otros, cambiando de forma definitiva la forma de hacer investigación en el conjunto universitario aragonés. Cómo una simple charla de sobremesa puede cambiar nuestra realidad.

En el año 2006, una nueva casualidad volvió a cambiar mi vida. Sobre la primavera fui invitado a asistir a unas jornadas sobre investigación en Biomedicina, organizadas por el Instituto Aragonés de Ciencias de la Salud en el Monasterio de Rueda. En ella participaba el entonces director del Instituto de Salud Carlos III, Francisco Gracia, a quien no conocía. Tras

ser presentado, reconocí en él al hijo del director de mi colegio público en Córdoba. En su intervención habló de la próxima creación de 7 centros de investigación biomédica en red (CIBERS) para distintas familias de patologías, con el objeto de dinamizar y coordinar la investigación biomédica y su traslación al sistema de salud español, y que estarían formados por grupos de excelencia seleccionados por comisiones internacionales. Tras la misma, me presenté, le recordé nuestros años de infancia, y le pregunté si el censo de CIBERS estaba cerrado. Me respondió que sí, y por qué le preguntaba. Le planteé que no entendía que no hubiese un CIBER que tuviese en cuenta la investigación en tecnologías relacionadas con el ámbito de la salud en su sentido más amplio. Tras una breve reflexión, me invitó a ir a Madrid a presentarle la idea. Yo era entonces un investigador relativamente poco conocido en el campo, por lo que decidí ir lo mejor armado posible. Tras un periplo por toda España, conseguí el aval de los principales grupos españoles, con el que me presenté ante la plana mayor del ISCIII, acompañado del director del IACS, Esteban de Manuel, y del consejero de economía de Aragón, a la sazón, Alberto Larraz. Tras la presentación y las preguntas pertinentes, nos fuimos con buenas sensaciones, pero faltos de esperanza. A las pocas semanas apareció el Real Decreto de creación de los CIBERS, entre los que estaba uno no previsto sobre Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina, que cambió completamente la perspectiva de la investigación en tecnologías de la salud en España, y el posicionamiento internacional de nuestro grupo, demostrando una vez más que el azar puede marcar vidas.



Figura 33. Portada del primer folleto informativo del 13A y del CIBER-BBN.

Tras mi mandato como primer director del CIBER-BBN, se me planteó la misma pregunta de siempre, ¿y ahora cómo poder seguir avanzando? Casualmente, se estaba fraguando por aquel entonces la futura titulación de Ingeniería de la Salud en la Universidad de Sevilla. Mis amigos, Jaime y José Domínguez (Pepón) me invitaron a involucrarme en su plan de estudios, y me plantearon la posibilidad de trasladarme a Sevilla para promover tal titulación. Yo tenía ya fuertes contactos con el director del Instituto de Biomedicina de Sevilla, José López Barneo, y dos doctores de mi grupo, José Antonio Sanz y Esther Reina, en la escuela de ingenieros de la misma ciudad, por lo que, sin ninguna decisión tomada, mantuve varias charlas con el Rector de la universidad. Tras constatar que sus intenciones no coincidían con las mías, decidí viajar a Sevilla para trasladar a mis amigos mi decisión negativa y mi agradecimiento por sus gestiones. Pepón me citó en un conocido bar de Sevilla, y tras argumentarle mi decisión, me preguntó si, al estar “libre” me podía plantear otra oferta. Me habló entonces de su idea de crear en Abengoa, un conocido conglomerado multinacional del campo de las energías renovables y sostenibilidad, y del cual era por entonces secretario general técnico, una pequeña empresa para hacer investigación de mayor riesgo y plazo de la que ya venía haciéndose en las distintas empresas del grupo. “¿Te podría

interesar el puesto de director científico?”, me dijo. Pepón era una persona con un carisma y una capacidad de convencimiento difícilmente superables, pero yo no tenía claro que en la empresa española se pudiese hacer investigación de ese tipo, lo que le argumenté para declinar su ofrecimiento. Él me solicitó entonces el favor de evaluar los currículos que se estaban recibiendo de candidatos a ser contratados dentro de esa empresa. “Por supuesto, sin problema”, le contesté.

Poco después, me envió alrededor de 90 solicitudes de un total de casi 900 recibidas. Me puse con la tarea, y cuál fue mi sorpresa cuando detecté doctores de Max Planck, de Yale y muchas otras universidades de primer nivel mundial, que avalaban sin duda la idea que Pepón me había transmitido. Le solicité entonces una nueva entrevista, para que me explicara con mayor detalle su idea. Tras hablar de lo novedoso y las posibilidades de esta propuesta, “venderme” que la administración y la gestión la llevarían otras personas, y que tendría presupuesto y libertad para contratar a quien decidiese, me invitó a ir a Sevilla, donde “nuestro presidente, Felipe Benjumea, seguro que te convence”. Ya en Sevilla, y tras las presentaciones, Felipe dijo una única frase “todo lo que te ha dicho Pepón, es verdad”. Convencido, acepté la propuesta, con el objetivo de ampliar mi experiencia en investigación privada.

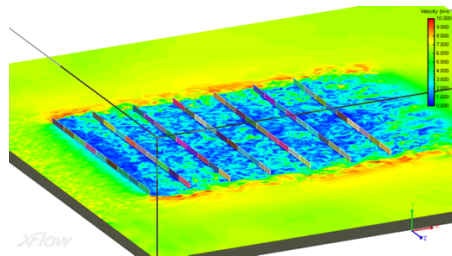


Figura 34. Cargas de viento en un campo solar. Aplicación en Abengoa Research.

Tengo que reconocer que lo que se me prometió, se cumplió. Abengoa Research pasó, en pocos años, de no existir a ser el Centro de Investigación Corporativo de todo el grupo Abengoa, una de las 35 mayores empresas españolas (con más de 30.000 empleados en 80 países y 8.500 millones de euros de facturación anual). En 2015, AR contaba con más de 400 empleados (300 investigadores y técnicos, 82 doctores y 15 estudiantes de doctorado), 6 divisiones, con centros en España y Estados Unidos, un presupuesto superior a los 50 millones de euros, laboratorios de primer nivel y la responsabilidad de convertir a Abengoa en líder mundial en energías renovables y sostenibilidad. En aquel momento, generábamos unas 60 patentes, decenas de publicaciones, y trabajábamos en más de 50 proyectos anuales, con la mitad aproximadamente financiados por la UE, convirtiéndonos en uno de los centros de investigación privados más importantes de España.

Los problemas financieros obligaron a Abengoa a interrumpir su labor investigadora, por lo que dimití y volví a Zaragoza, donde retomé mi carrera académica en junio de 2016. Sin embargo, en los cinco años que estuve en dicho grupo tuve la fortuna de conocer a personas de enorme valía profesional y humana, que se han convertido en mis amigos de por vida. Algunos me acompañan hoy, otros no han podido venir. También me deshice de prejuicios, aprendí nuevas formas de enfocar la investigación y la gestión, y cómo dirigir grandes grupos en distintas partes del mundo. Además, y no menor, me permitió conocer la vida e idiosincrasia sevillana, hacerme socio del Betis y de una caseta de la feria, y recuperar o crear nuevas amistades.

Espero haber dejado clara la importancia de algunos momentos, circunstancias y personas en la trayectoria personal y profesional de cada uno. El azar juega con nosotros, haciendo que el mérito personal sea solo uno más, si se quiere esencial, de los elementos que definen nuestra vida.

III.3. Lecciones que he aprendido. Un último mensaje a los más jóvenes

"If I have seen further it is by standing on the shoulders of Giants"

Isaac Newton

La universidad se encuentra hoy en una encrucijada histórica que, aunque comparte rasgos con otras crisis que ha atravesado a lo largo de su historia, presenta características nuevas que obligan a una reflexión profunda sobre su papel en la sociedad contemporánea. *Por primera vez en siglos, la universidad está perdiendo el monopolio* —o al menos la posición claramente dominante— *en las tres funciones que tradicionalmente han definido su identidad institucional*. La primera de ellas es la investigación. Durante gran parte del siglo XX, la mayor parte de la investigación científica avanzada se desarrollaba en universidades y centros públicos de investigación. Hoy, sin embargo, una proporción creciente del conocimiento más avanzado se genera en grandes empresas tecnológicas, en laboratorios industriales, o en centros privados de innovación. Sectores como la inteligencia artificial, la biotecnología o las tecnologías digitales muestran con claridad este cambio de paradigma, ya que un porcentaje elevado de las contribuciones científicas más influyentes proceden actualmente de organizaciones que operan fuera del ámbito académico.

La segunda función que la universidad ha dejado de monopolizar es la transmisión del conocimiento. Durante siglos, el acceso al saber especializado estuvo casi exclusivamente mediado por las instituciones universitarias. Hoy, ese panorama ha cambiado radicalmente. Internet, las plataformas educativas digitales, los cursos abiertos en línea y diversas formas de formación profesional o empresarial han multiplicado los

canales de acceso al conocimiento. Millones de personas adquieren hoy competencias avanzadas fuera de los sistemas educativos tradicionales, a través de recursos que hace apenas dos décadas resultaban impensables, hasta el punto de que muchos empiezan a preguntarse sobre la utilidad real de los estudios universitarios.



Figura 35. *Campus Bay View de Google en Mountain View, California.*

Otro cambio significativo se está produciendo en un tercer ámbito: la construcción de la opinión informada en la sociedad. Durante mucho tiempo, los universitarios —científicos, juristas, filósofos o economistas—, por no hablar de los maestros, desempeñaron un papel central en el debate público. Sus reflexiones contribuían a orientar las discusiones sociales sobre cuestiones complejas. Hoy ese espacio se ha transformado profundamente. Las redes sociales, los nuevos medios digitales y la llamada economía de la atención han generado un ecosistema comunicativo en el que la influencia no depende necesariamente del rigor intelectual ni del conocimiento experto. Influencers, youtubers, tiktokers y otros actores mediáticos pueden moldear la percepción pública sobre cuestiones científicas o tecnológicas, con una eficacia que supera la capacidad de intervención de la comunidad académica.

Este fenómeno forma parte de la tremenda transformación que está sufriendo el ecosistema de conocimiento en las sociedades

contemporáneas, y obliga a la universidad a replantearse su papel con honestidad intelectual. Si ya no posee el monopolio de la investigación, ni el de la formación, ni el de la construcción de opinión informada, ¿cuál es entonces su función en el siglo XXI?

La respuesta no puede consistir simplemente en tratar de competir con estos nuevos actores en su propio terreno, como han decidido hacerlo algunas universidades y centros puramente utilitaristas. La universidad no podrá superar a las grandes empresas tecnológicas en capacidad financiera para investigación aplicada, ni competir con internet en la difusión masiva de información, ni adaptarse completamente a la lógica acelerada de la comunicación digital. Intentarlo conduciría probablemente a la frustración y a la pérdida de su identidad más profunda.

El futuro de la universidad pasa más bien por reforzar aquello que históricamente ha constituido su singularidad. Frente a la velocidad de la información digital, la universidad debe reivindicar el valor del análisis riguroso y del pensamiento crítico. Frente a la simplificación inevitable de los mensajes en el espacio mediático, debe ofrecer profundidad, contexto y coherencia intelectual. Frente a la fragmentación del conocimiento contemporáneo, debe seguir siendo uno de los pocos espacios donde diferentes disciplinas dialogan de manera estructurada. Frente a la relativización moral, y el desprecio a la verdad, y los discursos tendenciosos o simplemente de odio, debe reforzar su honestidad intelectual y social, y mantener su papel de faro moral.

De cualquier forma, su aportación más valiosa seguirá siendo otra: la relación personal entre generaciones de universitarios. La mentoría cercana, honesta y exigente constituye una de las tradiciones más fecundas de la vida universitaria, y la más difícil de sustituir por cualquier tecnología. A lo largo de la historia, gran parte del progreso científico ha surgido

precisamente de esa relación directa entre maestro y discípulo que comparten preguntas, métodos y valores. En un mundo donde la información es abundante pero la orientación intelectual escasa, el papel del mentor adquiere una importancia renovada.

En última instancia, *el futuro de la universidad dependerá de su capacidad para reafirmar los valores que han sustentado su legitimidad durante siglos: coherencia intelectual, rigor formal, integridad ética y compromiso con la formación de nuevas generaciones capaces de pensar con autonomía.* En un mundo caracterizado por la volatilidad de la información y la relativización de muchos referentes culturales y morales, estos valores pueden parecer modestos, pero constituyen probablemente el fundamento más sólido sobre el que puede construirse una universidad relevante en el siglo XXI.

A pesar de todas las incertidumbres que he descrito a lo largo de estas páginas, sería un error concluir con una visión pesimista del futuro. El estudio detallado de la historia de la humanidad nos demuestra que, desde una visión larga y una perspectiva amplia de la humanidad, la mejora de las condiciones en las que se desenvuelve nuestra vida es constante [114], si bien, a corto plazo, se pueden producir distorsiones terribles, y será nuestra responsabilidad que se minimice su impacto en tiempo e intensidad.



Figura 36. *La universidad, componente esencial en la sociedad del futuro.*

Existen razones profundas para el optimismo. Nunca la humanidad había dispuesto de una capacidad científica, tecnológica y creativa comparable a la actual. Las mismas herramientas que generan inquietud —la inteligencia artificial, la biotecnología, las redes globales de conocimiento— ofrecen también oportunidades extraordinarias para comprender mejor el mundo y para resolver problemas que durante siglos parecieron irresolubles. La ciencia contemporánea se desarrolla a una velocidad y con una capacidad de cooperación internacional que no tiene precedentes históricos. Equipos formados por investigadores de distintos continentes trabajan hoy de manera conjunta sobre problemas como la fusión, el cáncer, las pandemias y las vacunas, el incremento de alimentos y recursos, la reducción de residuos, y la mitigación e incluso reversión de los efectos del cambio climático, cuya solución mejorará de forma decisiva la vida de millones de personas.

Querría poner como ejemplo de este optimismo, el concepto curioso de los respirocitos [115]. Son glóbulos rojos artificiales con prestaciones muy superiores a los biológicos. Aunque todavía no somos capaces de resolver todos los problemas de la ingeniería que permitirá construirlos, cuando lo consigamos solo necesitaremos respirar una vez cada dos horas.

En ese contexto, la universidad seguirá siendo uno de los pocos espacios donde el conocimiento puede cultivarse con la profundidad, la libertad y el sentido crítico que requiere el progreso humano. Si es capaz de preservar su rigor intelectual, su independencia y su vocación de servicio, continuará siendo una institución indispensable para formar ciudadanos libres, científicos responsables y profesionales comprometidos con el bienestar colectivo. *Mientras exista una comunidad de personas dispuestas a preguntar, a dudar y a aprender unas de otras, la universidad seguirá viva y mantendrá un papel imprescindible.*

Con el bagaje de edad, si hoy pudiera hablar con el profesor novel que fui hace tantos años, intentaría resumirle todo lo aprendido en unas pocas ideas sencillas:

- *Educar no consiste en transmitir información, sino en enseñar a pensar, a dudar, a equivocarse y a corregirse.*
- *Aprender y generar conocimiento libremente es un privilegio y una responsabilidad.* El conocimiento hay que compartirlo, ampliarlo y orientarlo hacia el bien común.
- *La curiosidad es el verdadero motor del conocimiento.* No investigamos porque tengamos que publicar, sino porque queremos comprender mejor el mundo.
- *La investigación es una forma de servicio* que permite mejorar la vida física, intelectual y social de las personas.
- *La investigación incremental es necesaria para avanzar en el conocimiento, pero la disruptiva cambia nuestras vidas;* luego, sin olvidar la primera, debemos cuidar la segunda.
- *Los grandes problemas no respetan fronteras disciplinares.* Las ideas más fértiles suelen surgir cuando se conectan campos distintos.
- *Aprender más allá de lo útil ensancha la mirada.* La ciencia necesita también historia, filosofía, arte y cultura para comprender plenamente su propio significado.
- *La generación de conocimiento científico es condición necesaria para el progreso tecnológico, pero no suficiente.* Para que el conocimiento se transforme en innovación es necesario un ecosistema complejo donde interactúan investigadores, empresas, centros de investigación, administraciones públicas e inversores. La universidad debe aprender a contribuir a ese ecosistema sin renunciar a su independencia intelectual.

- *La universidad es una conversación entre generaciones.* Nadie construye una trayectoria académica en soledad. Cada paso que damos descansa sobre el trabajo de quienes nos precedieron y sobre la generosidad de quienes trabajan con nosotros.
- *La universidad debe centrarse en su esencia:* formar personas curiosas, críticas y moralmente responsables, capaces de trabajar en las fronteras del conocimiento y de comprender que la técnica no es un fin en sí misma, sino un instrumento al servicio de la sociedad.

Quiero finalizar, privilegio de la edad, con un decálogo de consejos a los más jóvenes:

- *Sed agradecidos* con los que os precedieron y con los que os ayudan en vuestro desempeño.
- *Sed generosos.* La ciencia es abierta y ha de compartirse hasta sus últimos elementos.
- *Sed curiosos,* preguntad siempre “¿por qué?”, no os conforméis con respuestas superficiales. El saber ensancha la mirada, y la ciencia necesita de las humanidades.
- *Sed responsables.* Recordad que el éxito de una vida no se mide por los reconocimientos acumulados, sino por el bien que ha contribuido a generar.
- *Sed humildes.* Aunque el talento y el esfuerzo ayuda a progresar, el azar es determinante, así que relativizad vuestro mérito.
- *Sed leales* con las personas que os acompañan y las instituciones que os apoyan.
- *Sed solidarios* con los que no han tenido la misma fortuna que vosotros.
- *Sed constantes,* pues la profundidad exige tiempo. Las carreras largas las ganan quienes no se rinden.

- *Sed exigentes*, pues la exigencia personal es una muestra de respeto hacia uno mismo y hacia los demás.
- *Sed valientes*, probad, equivocaos. La zona de confort es cómoda, pero estéril.



Figura 37. *Un decálogo para el estudiante motivado.*

Soy consciente, sin embargo, de que cada generación vive su propia incertidumbre y sus propios desafíos, y ha de crear sus propias soluciones, y cometer sus propios errores, por lo que tenéis el derecho de hacer caso omiso de todos estos consejos. Pero, si alguno de ellos puede contribuir a vuestro crecimiento personal, a exigir algo más de vosotros, o a confiar en vuestra capacidad, entonces esta última lección habrá merecido la pena.

EPÍLOGO

Fight for the things that you care about. But do it in a way that will lead others to join you.

Ruth Bader Ginsburg

Si en los capítulos anteriores he intentado realizar la reflexión de la que hablaba al principio, situando la universidad en el contexto convulso de nuestro tiempo y un resumen de mi vida profesional, este último apartado requiere necesariamente un tono distinto, centrándome en lo personal.

No puedo comenzar sin expresar mi gratitud hacia los muchos —muchísimos— que han contribuido a que hoy pueda cerrar esta etapa con serenidad. No solo con satisfacción, sino también con esa sensación más difícil de describir que recientemente escuché a un buen amigo en un acto similar: *“me voy en paz conmigo mismo”*. No porque crea haber hecho nada extraordinario, sino porque tengo el convencimiento de haber intentado, con mayor o menor fortuna, cumplir con la responsabilidad que me correspondía hacia mi profesión, mi universidad, mis estudiantes y, en definitiva, hacia la sociedad.

Durante estos años, he tenido la ocasión de cumplir la mayoría de mis objetivos personales y profesionales. He impartido docencia a miles de estudiantes de grado, máster y doctorado, a los que he intentado transmitir las ideas que han conformado este discurso. Algunos de estos doctorandos son ahora investigadores en Europa y América, han obtenido cátedras y reconocimiento internacional, y demostrado ser lo que todo profesor anhela, mejores que yo, prolongando, ampliando y mejorando la escuela que en su día creó Enrique Alarcón, y que yo, como tantos otros compañeros, hemos intentado mantener.

He podido investigar libremente en lo que cada momento me ha demandado o he considerado interesante y útil. En todos los temas he

intentado aprender de los que me han rodeado, muchos de ellos también mejores que yo, contribuir en algo, y, siempre, abrir fronteras, aprender otros lenguajes y formas de hacer.

He tenido la oportunidad de viajar por todo el mundo, conocer otras culturas y otros entornos de trabajo, y hacer amigos inesperados para siempre. Ello me ha permitido ser abierto, humilde y receptivo a otras formas de pensar, priorizar y enfocar la vida y los problemas.

He entendido que el progreso individual, e incluso el de grupo, es condición necesaria, pero no suficiente. Hay que involucrarse en la mejora de la institución, contribuyendo en cada momento, desde la posición que toque, a la mejora del centro, el instituto, la universidad, la comunidad o el país. Así lo he tratado de hacer en la Escuela y fuera de ella. Quizás el defecto mayor que veo en mis jóvenes colegas sea el egoísmo de proteger a su colectivo más inmediato, olvidando la responsabilidad que tienen con el grupo más amplio.

He tenido la fortuna de contar con estudiantes que decidieron abordar la aventura y arrostrar el riesgo de crear nuevas empresas, por lo que he intentado contribuir a ellas en la medida de mis posibilidades y conocimiento. Por otra parte, tuve la suerte inmensa de participar desde el principio en un experimento único en la investigación privada en España, Abengoa Research. Allí no solo aprendí y crecí personal y profesionalmente, sino que ratifiqué mis ideas de que cuando muchos, y muy buenos, reman en la misma dirección, se consiguen grandes metas.

Finalmente, he intentado en todo momento ayudar a la sociedad en las funciones que me ha tocado desempeñar, ya sea en comités o puestos de evaluación, en consejos asesores, en academias u otras instituciones.

Obviamente, me han quedado muchas cosas en el tintero, algunas de ellas todavía en mis archivos del ordenador. También soy consciente de que no siempre tomé las mejores decisiones, que me obstiné en algunas de ellas, y también que no cumplí las expectativas de algunos. A los que sufrieron estos errores les pido perdón humildemente. Sin embargo, pueden estar seguros de que siempre actué pensando que tal decisión era lo mejor para todos y, a la larga, también para los afectados.

Soy plenamente consciente de que, en realidad, no he hecho más que devolver una pequeña parte de todo lo que otros hicieron antes por mí. Entre quienes influyeron decisivamente en mi formación, quiero recordar en primer lugar a mi maestro, Enrique Alarcón, figura señera de la ingeniería española e impulsor de una escuela a la que me honro en pertenecer. De él aprendí el rigor en el planteamiento de los problemas, la importancia de no perder nunca el vínculo entre la investigación teórica y su utilidad práctica, el respeto profundo por la tradición académica y el reconocimiento explícito a quienes nos precedieron, y la generosidad con quienes vienen después. Pero también algo menos tangible y quizá más decisivo: el gusto por el saber. Su ejemplo encarna el modelo de profesor al que desde entonces he intentado aproximarme, consciente de que el resultado sería necesariamente imperfecto.

Más tarde, durante mi estancia en la Universidad de Stanford, conocí a Juan Carlos Simó. Mi dedicación posterior a la mecánica de sólidos no lineal debe mucho a aquellas conversaciones y a su manera de entender la investigación científica. Con él comprendí que las ecuaciones no son únicamente un lenguaje técnico, sino una forma de pensar el mundo con precisión, cambiando mi forma de entender la ciencia.

A esas influencias se sumó el descubrimiento de la belleza formal de las matemáticas. Son muchos los profesores que contribuyeron a despertar y

alimentar esa sensibilidad: Juan García, en el instituto Séneca de Córdoba; Román Riaza, en la Escuela de Ingenieros Industriales de Madrid; Robert Kohn, en el Courant Institute de Nueva York; Jerry Marsden, en Stanford; Ray Ogden, luego. Cada uno, en distintos momentos y con diferentes acentos, contribuyó a consolidar una convicción que nunca me ha abandonado: la elegancia matemática no es un lujo estético, sino una forma de claridad intelectual.

Otro elemento esencial de cualquier trayectoria académica, y en mi caso lo ha sido, es la fortuna de trabajar con colegas y colaboradores de enorme talento. He tenido el privilegio de compartir largas discusiones y reflexiones con compañeros y amigos, de cuya inteligencia y rigor he aprendido tanto o más que de cualquier tratado. Antonio Martín, José y Jaime Domínguez, Federico París, Rafael Picón, Francisco García Benítez, Alfonso Fernández Canteli, y muchos otros, han contribuido de manera decisiva a mi comprensión de la mecánica de sólidos y computacional. Algunos de ellos se encuentran hoy aquí, otros no han podido venir, y varios no están ya entre nosotros, pero su influencia permanece en cada idea compartida y en cada conversación que contribuyó a ampliar mi manera de entender los problemas.

En segundo lugar —pero no menos importante— están mis compañeros del área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad de Zaragoza. Con ellos he compartido la mayor parte de mi vida profesional. Muchos fueron inicialmente alumnos y, con el tiempo, se convirtieron en colegas y en maestros en distintos aspectos. No puedo mencionarlos a todos, pero saben que mi gratitud hacia todos ellos es profunda y sincera. Por supuesto, quiero agradecer particularmente a todos los que han hecho posible este acto y me han hecho tan feliz, Elías, Iñaki, Fany, Miguel Ángel, Begoña, Roxana, y todos los demás.

A mis estudiantes de todos los niveles, en particular a los de doctorado. Son muchos y un conjunto importante de ellos coincide con los anteriores. La universidad tiene esa hermosa particularidad: la relación profesor–alumno puede transformarse, con el paso de los años, en colaboración entre iguales. Al margen de los ya citados, quiero representar en los dos primeros Sagrario Gómez en Madrid y Luis Gracia en Zaragoza, y en Jacobo Ayensa y Marina Pérez, que cerraron la lista (por el momento).

Como creo que ha quedado claro, a lo largo de estas décadas, mi trabajo universitario ha ocupado una parte muy importante de mi tiempo, de mis energías y, en no pocas ocasiones, de mis preocupaciones. La investigación, la docencia, la gestión universitaria y los proyectos compartidos con colegas en distintos lugares del mundo han exigido viajes, largas jornadas y ausencias inevitables.

Quiero por tanto agradecer a todas las personas que, en uno u otro momento, me apoyaron, me animaron. Tengo amigos por todo el mundo, muchos de ellos han podido venir hoy, y otros no, pero agradezco igualmente su amistad, en particular a los que han intervenido, Federico, Jaime, Juan Luis, Alfonso, Paco y Begoña. Entre muchos otros que no puedo citar en tan poco tiempo y espero que me disculpen, de Abengoa Research, Juan Luis, Juan Pablo, Manuel, Antonio, Jesús, Fernando y Shahzada, en representación de todos aquellos con los que tuve la fortuna de trabajar y aprender y con quienes, incluidas sus esposas, Estrella, Carmen, Eva, Adriana y María, sigo disfrutando de su amistad. Igualmente, a los muchos amigos del ámbito de la salud con lo que he trabajado, Daniel Palanca, Emilia Barrot, Ángel Ginel, Felipe Prósper, Ángel Borque y Ángel Lanás entre otros muchos. A mis compañeros del CIBER, y los amigos de las Academias de Ingeniería de España y de Ciencias de Europa y de Zaragoza, representados hoy aquí por Jaime Domínguez, amigo de tantos

años, Paco Herrera, José Manuel Torralba, y Antonio Huerta, y Antonio Elipe, de los que tanto aprendo. A Iñaki, Luis y Roxana, que me abrieron las puertas cuando volví a la universidad. A mis amigos de la Escuela, especialmente Manuel Silva, Rafael Navarro y Rafael Bilbao que nos dejaron, Finalmente, al conjunto de instituciones en la que he tenido la fortuna de trabajar y me permitieron desarrollar proyectos ambiciosos libremente, especialmente a mi Universidad de Zaragoza. Seguro que se me escapan muchísimos, pero saben que llevo a todos en el corazón.

A mis difuntos padres, a mis hermanos Emilio, Marisa y Lola, que me acompañan hoy, a mis amigos más cercanos, Julián y Esperanza, Antonio y Elena, Luis y Blanca, Javier y María José y mis queridos diez mandamientos. Gracias a Alberto, un hijo maravilloso, crítico conmigo y con la sociedad, inquieto, generoso y solidario, del que, aunque no se lo diga a menudo, estoy muy orgulloso. Junto a su esposa, mi querida Ayelén, me han dado lo más valioso que una persona pueda tener en sus últimos años, el cariño incondicional e inocente de mi nieta Vega, quién alegra mi vida y renueva cada día mi ilusión.

Finalmente, nada de todo eso habría sido posible sin el apoyo silencioso, constante y generoso de quien ha compartido conmigo toda esta travesía desde que éramos casi unos niños: mi esposa, Conchi. Ella ha estado presente en cada etapa de este camino, sin reclamar protagonismo alguno, renunciando a sus propias metas profesionales, y sosteniendo el equilibrio entre la vida personal y la académica. Quienes hemos dedicado nuestra vida a la universidad sabemos que esta profesión nunca termina al salir del despacho o del laboratorio; las ideas, los problemas y las preocupaciones nos acompañan a casa, a los viajes, incluso a los momentos que deberían ser de descanso. Conchi ha sabido convivir con todo ello con una mezcla admirable de paciencia, inteligencia y generosidad. Si hoy puedo mirar atrás

con la serenidad de haber recorrido un camino pleno de sentido, es en gran medida gracias a ella. Al final de una carrera, uno descubre algo que muchas veces nos pasa desapercibido: los artículos, los proyectos o los reconocimientos son importantes, pero no constituyen lo esencial. Lo esencial son las personas. Y si hay una sin la cual esta historia simplemente no habría existido, esa eres tú, Conchi.

Muchas gracias a todos por venir a acompañarme en este día tan especial.

REFERENCIAS

1. Eriksen, T.H. & Visentin, M. (2023) *Acceleration and Cultural Change: Dialogues from an Overheated World*. Springer Verlag. ISBN: 978-3031331015
2. Kelly, K. (2017) *The Inevitable: Understanding the 12 Technological Forces That Will Shape Our Future*. Penguin Publishing Group. ISBN: 978-0143110378
3. Susskind, D. (2024) *Growth: A Reckoning*. Allen Lane Ed. ISBN: 978-0241542309
4. Romer, P. M. (1990) Endogenous Technological Change. *Journal of Political Economy*, 98(5, Part 2), S71-S102.
5. Hassan, R. (2009) *Empires of Speed: Time and the Acceleration of Politics and Society*. Brill Academic Pub. ISBN: 978-9004175907
6. Hawthorne, J (2024) *The Age of Big Data: Harnessing Information for Insight and Impact*. RWG Publishing. ISBN-979-8330671236
7. Chayko, M. (2017) *Superconnected: The Internet, Digital Media, and Techno-Social Life*. SAGE Publications, Inc. ISBN: 978-1071805275
8. Talwar, R.; Wells, S.; Whittington, A. & Calle, H. (2018) *A Very Human Future: Enriching Humanity in a Digitized World*. Fast Future Publishing. ISBN: 978-1999931131
9. Brynjolfsson, E. & McAfee, A. (2016) *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*. W. W. Norton & Company. ISBN: 978-0393350647
10. Mollick, E. (2024) *Co-Intelligence: Living and Working with AI*. Portfolio. ISBN: 978-0593716717

11. Roco, M. C. & Bainbridge, W. S. (Eds.) (2010) *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*. Springer Verlag. ISBN: 978-9048162796
12. Kurzweil, R. (2001) *The Law of Accelerating Returns*. Published on KurzweilAI
13. Kurzweil, R. (2006) *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*. Penguin Publishing Group. ISBN: 978-0143037880
14. Twenge, J. M. (2017) *iGen: Why Today's Super-Connected Kids Are Growing Up Less Rebellious, More Tolerant, Less Happy--and Completely Unprepared for Adulthood--and What That Means for the Rest of Us*. Atria Books. ISBN: 978-1501152016
15. Sunstein, C. R. (2017) *#Republic: Divided Democracy in the Age of Social Media*. Princeton University Press. ISBN: 978-0691180908
16. Zuboff, S. (2019) *The Age of Surveillance Capitalism: The Fight for a Human Future at the New Frontier of Power*. Profile Books. ISBN: 978-1781256855
17. Noble, S. U. (2018) *Algorithms of Oppression: How Search Engines Reinforce Racism*. NYU Press. ISBN: 978-1479837243
18. Ford, M. (2015) *Rise of the Robots: Technology and the Threat of a Jobless Future*. Basic Books. ISBN: 978-0465059997
19. CITRINI & Shah, A. (2026) The 2028 global intelligence crisis. A Thought Exercise in Financial History, from the Future. Citrini Reports. <https://www.citriniresearch.com/p/2028gic>
20. Acemoglu, D. & Restrepo, P. (2019) Automation and New Tasks: How Technology Displaces and Reinstates Labor. *Journal of Economic Perspectives*, 33(2), 3–30
21. Standing, G. (2011) *The Precariat: The New Dangerous Class*. Bloomsbury Academic. ISBN: 978-1474294164

22. Bostrom, N. (2016) *Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies*. Oxford University Press. ISBN: 978-0198739838
23. Chalmers, D. J. (2010) The Singularity: A Philosophical Analysis. *Journal of Consciousness Studies*, 17(9-10), 7–65
24. Scharre, P. (2018) *Army of None: Autonomous Weapons and the Future of War*. W. W. Norton & Company. ISBN: 978-0393608984
25. Gates, K.A. (2011) *Our Biometric Future: Facial Recognition Technology and the Culture of Surveillance*. New York University Press. ISBN: 978-0814732106
26. Hawley, J. (2021) *The Tyranny of Big Tech*. Regnery. ISBN: 978-1684512393
27. Harari, Y. N. (2017) *Homo Deus: A Brief History of Tomorrow*. Harper. ISBN: 978-0062464316
28. Möller, M. & Vuik, C. (2017) On the impact of quantum computing technology on future developments in high-performance scientific computing. *Ethics Inf Technol* 19, 253–269
29. Preskill, J. (2018) Quantum Computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79
30. Drexler, E. (1987) *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. Knopf Doubleday Publishing Group. ISBN: 978-0385199735
31. Allhoff, F.; Lin, P.; Moor, J. & Weckert, J. (2007) *Nanoethics: The Ethical and Social Implications of Nanotechnology*. JE. ISBN: 978-0470084175
32. Church, G.M. & Regis, E. (2012) *Regenesis: How Synthetic Biology Will Reinvent Nature and Ourselves*. Basic Civitas Books. ISBN: 978-0465021758
33. Amodeli, D. (2024) *Machines of Loving Grace. How AI Could Transform the World for the Better*.
<https://www.darioamodei.com/essay/machines-of-loving-grace>

34. Osterholm, M.T. & Olshaker, M. (2025) *The Big One: How We Must Prepare for Future Deadly Pandemics*. Little Brown and Company. ISBN: 978-0316258340
35. Sandel, M. J. (2007) *The Case Against Perfection: Ethics in the Age of Genetic Engineering*. Belknap Press. ISBN: 978-0674019270
36. Rose S. (2006) *The Future of the Brain: The Promise and Perils of Tomorrow's Neuroscience*. Oxford University Press. ISBN: 978-0195308938
37. Abu-Shawareb, H.; Acree, R.; Adams, P.; Adams, J.; Addis, B.; Aden, Adrian, P.; Afeyan, B.B. et al. (2024) Achievement of Target Gain Larger than Unity in an Inertial Fusion Experiment. *Phys. Rev. Lett.* 132, 065102.
38. IEA (2025), The Path to a New Era for Nuclear Energy, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-path-to-a-new-era-for-nuclear-energy>
39. Diamandis, P. H.; & Kotler, S. (2020) *Abundance: The Future Is Better Than You Think*. Simon & Schuster USA. ISBN: 978-1982109660
40. Ord, T. (2020) *The Precipice: Existential Risk and the Future of Humanity*. Hachette Books. ISBN: 978-0316484916
41. Huesemann, M. & Huesemann, J. (2011) *Techno-Fix: Why Technology Won't Save Us Or the Environment*. New Society Publishers. ISBN: 978-0865717046
42. Fisher, J.R. (2021) *The Rise and Fall of the Human Empire*. Editado por el autor. ISBN: 979-8764637532
43. Nah, A.M. (2020) *Protecting Human Rights Defenders At Risk*. Routledge. ISBN: 978-1138392618
44. Arnell, N. (2015) *A Short Guide to Climate Change Risk*. Routledge. ISBN: 978-1409453529
45. Kolbert, E. (2014) *The Sixth Extinction: An Unnatural History*. Macmillan USA. ISBN: 978-0805092998

46. Ritchie, H. (2024) *Not the End of the World*. Vintage. ISBN: 978-1529931242
47. Gates, B. (2022) *How to Avoid a Climate Disaster*. Knopf Doubleday Publishing Group. ISBN: 978-0593081853
48. Bullock, J.B. et al. (eds.) (2023) *The Oxford Handbook of AI Governance*. Oxford Academic. ISBN: 978-0-19-754217-0.
49. Darwin, C. (1959) *On the Origin of Species*. London
50. Bowen, J.A. (2025) *Teaching with AI: A Practical Guide to a New Era of Human Learning*. Johns Hopkins University Press (2nd Ed.) ISBN: 978-1421453392
51. Ahmad, S. & Doblaré, M. (2026) Walking with the Lions: Pearls and Pitfalls of Mentoring (under revision)
52. Sandel, M. J. (2020) *The Tyranny of Merit: What's Become of the Common Good?* Farrar Straus & Giroux. ISBN: 978-0374289980
53. UNESCO. (2021) *La ciencia al servicio de la sociedad*. <https://es.unesco.org/themes/ciencia-al-servicio-sociedad>
54. Bongaerts, J.C. (2022) The Humboldtian Model of Higher Education and its Significance for the European University on Responsible Consumption and Production. *Berg Huetttenmaenn Monatsb* 167, 500–507
55. National Human Genome Research Institute (2003) *The Human Genome Project*. <https://www.genome.gov/human-genome-project>
56. EU Commision (2023), *Human Brain Project Flagship*. <https://www.humanbrainproject.eu/en/>
57. World Intellectual Property Organization. (2026) *Innovation Capabilities Outlook 2026*. ISBN: 978-92-805-3894-6 <https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo-pub-1091-en-innovation-capabilities-outlook-2026.pdf>

58. Bloom, N.; Jones, C.I.; Van Reenen, J. & Webb, M. (2020) Are Ideas Getting Harder to Find?. *American Economic Review*, 110(4):1104–44.
59. Klein, E. & Thompson, D. (2025) *Abundance: What Progress Takes*. Avid Reader Press. ISBN: 978-1668023488
60. Bhattacharya, J. & Packalen, M. (2020) Stagnation and scientific incentives. Working Paper 26752 Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. <http://www.n-ber.org/papers/w26752>
61. Acemoglu, D. (2002) Directed Technical Change. *The Review of Economic Studies*, 69(4), 781–809.
62. Gobierno de España. (2021) Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación 2021-2027. <https://http://www.ciencia.gob.es/InfoGeneralPortal/documento/e8183a4d-3164-4f30-ac5f-d75f1ad55059>
62. Rodríguez-Navarro, A. (2022) *Cómo medir el éxito científico*. Aula Magna Proyecto Clave McGraw Hill. ISBN: 978-8419187413
63. ICREA (2025) ICREAMEMOIR2024. <https://memoir.icrea.cat/>
64. Medwar, P.B. (1980) *Advice to a Young Scientist*. Joanna Cotler Books. ISBN: 978-0063370067
65. Lawrence, P. A. (2016) The last 50 years: Mismeasurement and mismanagement are impeding scientific research. *Current Topics in Developmental Biology*, 116:617-631.
66. Rodríguez-Navarro, A. & Brito, R. (2023) The extreme upper tail of Japan's citation distribution reveals its research success. arXiv:2201.04031. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.04031>
67. Herranz, N. & Ruiz-Castillo, J. (2011) The end of the European Paradox. Centre for Economic Policy and Research. <file:///Users/manueldoblare/Downloads/ssrn-1976016-1.pdf>
68. World Intellectual Property Organization (WIPO) (2023) Global Innovation Index. <https://www.wipo.int/en/web/global-innovation-index/2023/index>

69. Snow, C.P. (1959) *The Two Cultures and the Scientific Revolution*. Cambridge University Press.
70. Pierre, J. (2025) *False: How Mistrust, Disinformation, and Motivated Reasoning Make Us Believe Things that Aren't True*. OUP USA. ISBN: 978-0197765272
71. Robert, J.; Faris, R. & Roberts, H. (2018) *Network Propaganda: Manipulation, Disinformation, and Radicalization in American Politics*. OUP USA. ISBN: 978-0190923631
72. Doblare, M. (2008) Retos y oportunidades de la investigación transdisciplinar. Reflexión sobre el papel de la mecánica de materiales en biomedicine. Real Academia de Ingeniería. <https://www.raing.es/discursoringreso/retos-y-oportunidades-de-la-investigacion-transdisciplinar-reflexion-sobre-el-papel-de-la-mecanica-de-materiales-en-biomedicina/>
73. Nicolescu B. (1998) Gödelian *Aspects of Nature and Knowledge*. Bulletin Interactif du Centre International de Recherches et Études transdisciplinaires. <http://perso.club-internet.fr/nicol/ciret/>
74. Gibbons, M.; Limoges, C.; Nowotny, H.; Schwartzman, S.; Scott, P. & Trow, M. (1994) *The New Production of Knowledge: The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies*. SAGE Publications Ltd. ISBN: 978-0803977938
75. Doblare, M. & Garcia-Aznar J.M. (2002) Anisotropic bone remodelling model based on a continuum damage-repair theory. *Journal of Biomechanics*, 35(1):1–17
76. Rothschild, J.L & Mancinelli R.L. (2001) Life in extreme environments. *Nature*, 409(6823):1092–1101, 2001.
77. Tu, Y & Rappel W.-J. (2018) Adaptation in living systems. *Annual review of condensed matter physics*, 9(1):183–205

78. Abbas A.K.; Lichtman, A.H. & Pillai, S. (2021) *Cellular and molecular immunology*. Elsevier (10th edition), ISBN 978-0323479783
79. Futuyma, D.J. & Kirkpatrick, M. (2017) *Evolution*. Sinauer Associates, ISBN 978-1605356051
80. Billman, G.E. (2020) Homeostasis: the underappreciated and often ignored central organizing principle of physiology. *Frontiers in Physiology*, 11:200.
81. Jaenisch, R. & Bird, A. (2003) Epigenetic regulation of gene expression: how the genome integrates intrinsic and environmental signals. *Nature Genetics*, 33(3s):245–254.
82. Cannon, W.B. (1932) *The wisdom of the body*. Norton,
83. Angilletta, M.J. Jr; Youngblood, J.P.; Neel, L.K. & Vanden-Brooks, J.M. (2019) The neuroscience of adaptive thermoregulation. *Neuroscience Letters*, 112:103491.
84. Frost, H.M. (2003) Bone's mechanostat: A 2003 update. *The anatomical record. Part A, Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology*, 275A:1081–1101.
85. Frost, H.M. (1964) Dynamics of bone remodelling. In *Bone remodeling*, 315–333.
86. Riggs, D.S. (1976) *Control theory and physiological feedback mechanisms*. RE Krieger Pub Co. ISBN 9780882753584
87. Zhou, K. & Doyle, J.C. (1998) *Essentials of robust control*, volume 104. Prentice Hall, ISBN 978-0135258330
88. Allis, C.D.; Jenuwein, T.; Reinberg, D. & Caparros, M.L. (eds.) (2007) *Epigenetics*. Cold Spring Harbor Laboratory Press, ISBN 978-0879697242
89. Lacal, I. & Ventura, R. (2018) Epigenetic inheritance: concepts, mechanisms and perspectives. *Frontiers in Molecular Neuroscience*, 11:292.

90. Coleman, B. & Gurtin, E. (1967) Thermodynamics with internal state variables. *Journal of Chemistry and Physics*, 47:597–613.
91. Simo, J.C. & Hughes, T.J.R. (1998) *Computational inelasticity*. Springer, ISBN 978-0387975207
92. Lemaitre, J. (1985) A continuous damage mechanics model for ductile fracture. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 107:83–89.
93. Doblaré, M.; Pérez-Aliacar, M.; Ayensa-Jiménez, J. & Ashrafi, M. (2026) A phenomenological mathematical framework to model homeostasis as a robust, adaptive control system. Similarities with continuum nonlinear physics with internal variables, *Mechanics of Materials*, 213, 105546.
94. Bray, F.; Laversanne, M.; Sung, H.; Ferlay, J.; Siegel, R.L.; Soerjomataram, I. & Jemal, A. (2024) *Global cancer statistics 2022: Globocan estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries*. *CA: a cancer journal for clinicians*, 74(3):229–263
95. Batash, R.; Asna, N.; Schaffer, P.; Francis, M. & Schaffer, M. (2017) Glioblastoma multiforme, diagnosis and treatment; recent literature review. *Current medicinal chemistry*, 24(27):3002–3009.
96. Grochans, S.; Cybulska, A.M.; Siminska, D.; Korbecki, J.; Kojder, K.; Chlubek, D. & Baranowska-Bosiacka, I. (2022) Epidemiology of glioblastoma multiforme—literature review. *Cancers*, 14(10):2412
97. Stankovic, T.; Randelovic, T.; Dragoj, M.; Stojkovic Buric, S.; Fernández, L.; Ochoa, I.; Pérez-García, V.M. & Pesic, M. (2021) In vitro biomimetic models for glioblastoma—a promising tool for drug response studies. *Drug Resistance Updates*, 55:100753
98. Jiapaer, S.; Furuta, T.; Tanaka, S.; Kitabayashi, T. & Nakada, M. (2018) Potential strategies overcoming the temozolomide resistance for glioblastoma. *Neurologia medico-chirurgica*, 58(10):405–421.

99. Oike, T.; Suzuki, Y.; Sugawara, K.; Shirai, K.; Noda, S.; Tamaki, T.; Nagaishi, M.; Yokoo, H.; Nakazato, Y. & Nakano, T. (2013) Radiotherapy plus concomitant adjuvant temozolomide for glioblastoma: Japanese mono-institutional results. *PLoS One*, 8(11):e78943.
100. Stupp, R.; Mason, W.P.; Van Den Bent, M.J.; Weller, M.; Fisher, B.; Taphoorn, M.J.B.; Belanger, K.; Brandes, A.A.; Marosi, C.; Bogdahn, U. et al. (2005) Radiotherapy plus concomitant and adjuvant temozolomide for glioblastoma. *New England journal of medicine*, 352(10):987–996.
101. Ali, M.D.Y.; Oliva, C.R.; Noman, A.S.M.; Allen, B.G.; Goswami, P.C.; Zakharia, Y.; Monga, V.; Spitz, D.R.; Buatti, J.M. & Griguer, C.E. (2020) Radioresistance in glioblastoma and the development of radiosensitizers. *Cancers*, 12(9):251.
102. Singh, N.; Miner, A.; Hennis, L. & Mittal, S. (2021) Mechanisms of temozolomide resistance in glioblastoma—a comprehensive review. *Cancer drug resistance*, 4(1):17.
103. Duncan, E.J. Gluckman, P.D. & Dearden, P.K. (2014) Epigenetics, plasticity, and evolution: How do we link epigenetic change to phenotype? *Journal of Experimental Zoology Part B: Molecular and Developmental Evolution*, 322(4):208–220.
104. Hanahan, D. (2022) Hallmarks of cancer: new dimensions. *Cancer discovery*, 12(1): 31–46.
105. Aasland, D.; Gotzinger, L.; Hauck, L.; Berte, N.; Meyer, J.; Effenberger, M.; Schneider, S.; Reuber, E.E.; Roos, W.P.; Tomicic, M.T. et al. (2019) Temozolomide induces senescence and repression of dna repair pathways in glioblastoma cells via activation of atr-chk1, p21, and nf- κ b. *Cancer research*, 79(1):99–113, 2

106. Gunther, W.; Pawlak, E.; Damasceno, R.; Arnold, H. & Terzis, A.J. (2003) Temozolomide induces apoptosis and senescence in glioma cells cultured as multicellular spheroids. *British journal of cancer*, 88(3):463–469.
107. Lee, S.Y. (2016) Temozolomide resistance in glioblastoma multiforme. *Genes & diseases*, 3(3):198–210.
108. Silva, A.O.; Dalsin, E.; Onzi, G.R.; Filippi-Chiela, E.C. & Lenz, G. (2016) The regrowth kinetic of the surviving population is independent of acute and chronic responses to temozolomide in glioblastoma cell lines. *Experimental Cell Research*, 348(2):177–183.
109. Tomar, M.S.; Kumar, A.; Srivastava, C. & Shrivastava, A. (2021) Elucidating the mechanisms of temozolomide resistance in gliomas and the strategies to overcome the resistance. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Reviews on Cancer*, 1876(2):188616.
110. Nath S. & Devi, G.R. (2016) Three-dimensional culture systems in cancer research: Focus on tumor spheroid model. *Pharmacology & therapeutics*, 163:94–108.
111. Nunes, A.S.; Barros, A.S.; Costa, E.C.; Moreira, A.F. & Correia, I.J. (2019) 3d tumor spheroids as in vitro models to mimic in vivo human solid tumors resistance to therapeutic drugs. *Biotechnology and bioengineering*, 116(1):206–226.
112. Pérez-Aliacar, M.; Ayensa-Jiménez, J. & Doblaré, M. (2023) Modelling cell adaptation using internal variables: Accounting for cell plasticity in continuum mathematical biology. *Computers in Biology and Medicine*, 164:107291.
113. Gilbert, M.R.; Wang, M. Aldape, K.D.; Stupp, R.; Hegi, M.E.; Jaeckle, K.A.; Armstrong, T.S.; Wefel, J.S.; Won, M.; Blumenthal, D.T. et al. (2013) Dose-dense temozolomide for newly diagnosed glioblastoma:

- a randomized phase iii clinical trial. *Journal of clinical oncology*, 31(32):4085–4091.
114. Pinker, S. (2018) *Enlightenment Now: The Case for Reason, Science, Humanism, and Progress*. Viking. ISBN: 978-0525427575
115. Freitas, R. A.; Jr. (1998) Exploratory Design in Medical Nanotechnology: A Artificial Mechanical Erythrocyte. *Artificial Cells, Blood Substitutes, and Immobilization Biotechnology*, 26(4), 411–430.



Universidad Zaragoza



Real Academia de Ingeniería